

Masteroppgave ved institutt for Geografi

Hydrologisk analyse av en norsk fjellelv i et klima i forandring

- En GIS-studie ved hjelp av Nevina og HEC-RAS

Petter Olufsen Aasen

Trondheim, 2018

Veileder: Ivar Berthling

Bi-veileder: Jon Anders Bordal

Våren 2018

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Fakultet for samfunns- og utdanningsvitenskap

Institutt for Geografi

Abstract

In a changing climate, one of the biggest challenges is to maintain a strong and safe infrastructure that can handle water on devious ways. Increased temperatures will possibly lead to more heavy rain in future Norway. In 2011 and 2013, Gudbrandsdalen was hit by two major flooding events, which caused heavy damages to infrastructure and buildings. A smaller watershed in steep terrain has a rapid response to flash floods that often causes water on devious ways, and large amount of erosion rates. During a flash flood, the water can achieve high velocity, which causes large damages due to the way water erodes and moves large amount of masses.

Hydrological dimensioning is a major challenge in smaller catchment, where there often is less data available. In analysis of smaller catchment, the methods used have a higher level of uncertainty. Due to the large damages smaller catchments can cause, this will be a major focus in the future climate. To find a solution to calculate problems in unmeasured catchments, the calculation tool Nevina will be tested in this master's thesis. Hydrological Engineering Center-River Analysis System (HEC-RAS) is used to simulate different levels of water-discharge (m^3/s). Thanks to Nevina, different water-discharge for given scenarios has been simulated using HEC-RAS. The main goal of this thesis is to investigate if the combination of Nevina and HEC-RAS can be used in future flood analysis in unmeasured catchments. A comparison will be conducted against the precipitation event in July 2017, to investigate how accurate this analyse is.

Sammendrag

I et klima i forandring er en av de største utfordringene å ivareta en sterk og trygg infrastruktur som takler flomhendelser og vann på avveie. Med økte temperaturer vil det kunne forventes store nedbørsmengder i fremtidens Norge. I Gudbrandsdalen førte to store flomhendelser i 2011 og 2013 til store skader på infrastruktur og bebyggelse. Mindre vassdrag i bratt terreng har en hurtig respons på styrtregn og ofte forårsaker dette vann på avveie med sterk erosjonskraft. Gjennom en styrtflom kan vannet oppnå høy hastighet og utgjør en stor skade gjennom vannets evne til å grave og flytte masser.

Hydrologisk dimensjonering er en stor utfordring i små felt, hvor det ofte ikke er data tilgjengelig. Dette medfører at metodene for umålte felt har en usikkerhet ved seg. På grunn av de store skadene som små, bratte fjellelver kan føre med seg, er dette et viktig fokusområde i framtidens klima. Som en mulig løsning er det i denne masteroppgaven undersøkt om Nevina kan fungere som et verktøy for beregninger av umålte felt. Ved bruk av Hydrological Engineering Center – River Analysis System (HEC-RAS) har det blitt simulert ulike gjentaksintervaller. Ved hjelp av Nevina har ulike vannføring for gitte flomscenarier blitt simulert gjennom HEC-RAS. Formålet med denne kombinasjonen er å finne ut om disse to kan danne grunnlag for en bedre og enklere løsning for flommodellering av små, umålte felt. En sammenligning mot nedbørshendelsen i juli 2017 vil bli gjort, der det vil bli sett på hvor nøyaktig analysen er.

Forord

Jeg har alltid vært glad i å være ute i naturen, og derfor ble Geografi et enkelt valg når jeg skulle velge studieretning. Ulike feltkurs gjennom studietiden har ført til en stor interesse for naturgeografien, og spesielt fluviale prosesser og vannhåndtering. Sommerjobber hos Kartverket har gitt meg en utvidet interesse for geografiske informasjonssystemer. Når masteroppgaven skulle skrives var det tidlig klart at temaet skulle ha en kombinasjon av disse elementene. Masteroppgaven er skrevet i samarbeid med Statens Kartverk avd. Hamar, og betyr slutten på mine fem år som student ved institutt for Geografi, NTNU.

En stor takk rettes til veileder Ivar Berthling som har bidratt med god veiledning, lærerike diskusjoner og konstruktive tilbakemeldinger gjennom skrivingen av masteroppgaven. Jon Anders Bordal ved Kartverket avd. Hamar fortjener også en stor takk for tilbakemeldinger gjennom korrekturlesing og spørsmål om data som har blitt benyttet i oppgaven. Det er også nødvendig med en takk til professor Knut Alfredsen, for gode tips ved bruk av HEC-RAS. Studiekameraten Henning Sigstad takkes for et godt samarbeid gjennom både feltarbeid og i prosesseringen av data. En stor takk rettes til studiekamerat Tormod Brede for assistanse under feltarbeidet.

Sist, men ikke minst, vil jeg takke kull 2013 for fem svært artige og lærerike år på geografistudiet. Dere har gitt meg utallige morsomme stunder gjennom studiehverdagen og ulike feltkurs, og studiet hadde ikke vært det samme uten dere.

Trondheim, 15. mai 2018

Petter Olufsen Aasen

Innholdsfortegnelse

Abstract	III
Sammendrag	III
Forord	V
Innholdsfortegnelse	VII
Figurliste	X
Formelliste	XII
Tabelliste	XII
Forkortelser	XIII
1 Innledning	1
2 Områdebeskrivelse	3
2.1 Klima	5
2.2 Tidligere hendelser	8
2.3 Kwartærgeologi	9
2.4 Løsmassekart	10
3 Teori	13
3.1 Hydrologiske prosesser	13
3.2 Hydrologiske analyser	13
3.3 Hydrologiske studier	16
3.4 Beregninger/kalkulasjoner i prosessen	17
3.4.1 Kulvert-hydraulikk	17
3.4.2 Bevegelsesligning	18
3.4.3 Oppdeling av tverrsnitt for transportkalkulering	19
3.4.4 Mannings Formel	21
3.5 Overflateavrenning	22
3.6 Vegetasjon	25
3.7 Bratte fjellelver	27
3.8 Flom	27
3.9 Styrftlom	28
3.10 Fluvial erosjon	29
4 Metode	31
4.1 Datainnsamling	31
4.2 LiDAR	31
4.3 LAS-datasett	33
4.4 Digital høydemodell (DEM)	35
4.4.1 Clip	36
4.4.2 TIN	37
4.4.3 Grid	38
4.5 Forsenkning (Sink)	40
4.6 Gjentetting av forsenkninger (Fill)	41

4.7	<i>Helling (slope)</i>	41
4.8	<i>Flommodellering ved bruk av TIN-baserte høydemodeller</i>	42
4.9	<i>Interpolering</i>	43
4.9.1	<i>Invers avstandsvektning</i>	43
4.9.2	<i>Naturlig Nabo</i>	45
4.10	<i>HEC-RAS</i>	45
4.10.1	<i>Introduksjon</i>	45
4.11	<i>Elvesystem</i>	46
4.12	<i>Tverrsnitt</i>	48
4.13	<i>Strømningslinjer</i>	51
4.14	<i>Banklinjer</i>	52
4.15	<i>Blokkerte hindringer</i>	53
4.16	<i>Arealbruk</i>	55
4.17	<i>Kulverter</i>	56
4.17.1	<i>Modellering av kulverter</i>	56
4.18	<i>Steady flow</i>	58
4.19	<i>Nevina</i>	60
4.19.1	<i>Generelt</i>	60
5	Resultater	69
5.1	<i>Nevina</i>	69
5.2	<i>HEC-RAS</i>	72
5.2.1	<i>Tverrsnitt</i>	72
5.2.2	<i>Kulverter</i>	75
5.2.3	<i>Bankstasjoner</i>	78
5.3	<i>Digital høydemodell og Grid i HEC-RAS</i>	80
5.4	<i>RAS-Mapping</i>	80
5.4.1	<i>Generering av vannoverflate</i>	82
5.4.2	<i>Blokkering av kulverter</i>	84
5.4.3	<i>Flomutbredelse</i>	85
5.5	<i>Hindringer og avgjørelser i HEC-RAS</i>	95
6	Diskusjon	99
6.1	<i>Terrengmodell</i>	99
6.2	<i>Positive og negative aspekter ved TIN og grid</i>	100
6.3	<i>Utfordringer ved digitalisering</i>	101
6.4	<i>Feilkilder og mangler i prosessen</i>	102
6.5	<i>Usikkerheter ved kartlegging av flomutbredelse</i>	105
6.6	<i>Sammenligning av åpne og blokkerte kulverter</i>	106
6.7	<i>Overflateavrenning og infiltrasjonsevne i Brandrudsåa</i>	107
6.8	<i>Potensialet til HEC-RAS og Nevina</i>	110
7	Konklusjon	113
8	Videre arbeid	113
9	Referanseliste	115
10	Appendix A	i
10.1	<i>Flomutbredelse, Ysteri- og Eksisvegen</i>	i
10.2	<i>Flomutbredelse, Kvarvvegen</i>	ii
10.3	<i>Forbedret tverrsnitt, Ysteri- og Eksisvegen</i>	iii
10.4	<i>Forbedret tverrsnitt, Kvarvvegen</i>	iv

10.5	<i>Blokkerte kulverter med forbedret tverrsnitt, Ysteri- og Eksisvegen</i>	v
10.6	<i>Blokkerte kulverter med forbedret tverrsnitt, Kvarvvegen</i>	vi
10.7	<i>Blokkerte kulverter med forbedret tverrsnitt og grid, Ysteri- og Eksisvegen</i>	vii
10.8	<i>Blokkerte kulverter, med forbedret tverrsnitt og grid, Kvarvvegen</i>	viii
10.9	<i>Forbedret tverrsnitt med grid, Ysteri- og Eksisvegen</i>	ix
10.10	<i>Forbedret tverrsnitt og grid sted, Kvarvvegen</i>	x
10.11	<i>Klimapåslag 200-årsflom, Ysteri- og Eksisvegen og Kvarvvegen</i>	xi
10.12	<i>Mannings n-verdier</i>	xii
10.13	<i>Kartillustrasjon over Kvarvvegen og Ysteri- og Eksisvegen</i>	xiv

Figurliste

Figur 2-1: Oversiktskart over arealbruk i området rundt Brandrudsåa (Nibio, 2018).....	3
Figur 2-2: Høydeprofil over Brandrudsåa (Norgeskart, 2018).....	4
Figur 2-3: Analyseområde indikert med blå sirkel. (InnlandsGIS, 2018).	5
Figur 2-4: Hvordan har nedbøren endret seg for Østlandet i % fra 1900 til 2017 (MET,2018).	6
Figur 2-5: Temperaturavvik fra normalen for Østlandet for 1900–2017 (Met.no, 2018).	6
Figur 2-6: Løsmassekart over Brandrudsåa (NGU, 2018a).....	10
Figur 3-1: IVF-kurve for millimeter for 18701 OSLO-Blindern. (Periode 1968-2014) (Stenius et al., 2015).	14
Figur 3-2: Kulvert-hydraulikk (Brunner, 2016).	18
Figur 3-3: Anvendelse av prinsipp for bevegelse (Brunner, 1996).	19
Figur 3-4: HEC-RAS standardmetode for utregning av inndeling av kolonner (Brunner, 2016).	20
Figur 3-5: Alternativ metode for utregning av inndeling av kolonner (Brunner, 2016).....	20
Figur 3-6: Fysiske prosesser involvert i avrenningsprosesser (Tarbaton, 2003).....	22
Figur 3-7: Vanntilgang, infiltrasjon og avrenning ved bruk av Hortons infiltrasjonsligning (Tarbaton, 2003).....	23
Figur 3-8: Forskjellige avrenningsprosesser og dens hydrologiske veier (Tarbaton, 2003). ...	24
Figur 3-9: Forholdet avrenningsrate og fuktighetsinnhold i jorda (Tarbaton, 2003).	25
Figur 3-10: Infiltrasjonsevne for løsmassene i Brandrudsåa (NGU, 2018b).	26
Figur 3-11: Hvordan vil den prosentvise endringen i størrelsen for 200-årsflommer for framtidspersiden 2071-2100 være (Hansen et al., 2015).	28
Figur 3-12: Hvor i en elvesving vil erosjonen være størst (Fergus et al., 2010b).....	30
Figur 4-1: Lidar scanning gjort fra fly (MESH, 2010).....	32
Figur 4-2: Illustrasjon over hvordan utsendt signal forandrer seg fra første til siste retur (Lohani, 2008).	33
Figur 4-3: Oversikt over prosessering av LAS-data.	34
Figur 4-4: Prosessen fra LAS-filer til ferdig konstruert DEM/TIN.....	35
Figur 4-5: Illustrasjon av hvordan verktøyet "Clip" fungerer.....	37
Figur 4-6: TIN-struktur basert på Delaunay-triangulering av høydepunkter (Rød, 2015).....	37
Figur 4-7: Illustrasjon av oppbyggingen av "fliser" i et rutenett (Esri, 2008).....	39
Figur 4-8: Sammenligning av en TIN-DEM og DEM av rutenett (Hengl & Evans, 2009).	40
Figur 4-9: Hvordan fungerer fill (Esri, 2017).	41
Figur 4-10: Helling, Brandrudsåa.	42
Figur 4-11: Naturlig Nabo (ArcGIS, 2016).	45
Figur 4-12: HEC-RAS hovedmeny (Brunner, 2016).....	46
Figur 4-13: Eksempel på et elveskjema, med forgreina elver, og et utsnitt av elveskjemaet i denne oppgaven (Brunner, 2016).	48
Figur 4-14: Avstand mellom tverrsnitt.	48
Figur 4-15: Egenskapstabell for tverrsnitt.....	49
Figur 4-16: Eksempel på tverrsnitt (Brunner, 2016).....	50
Figur 4-17: Illustrasjon "strømningslinjer" fra Ackerman (2012) og egen digitalisering.	52
Figur 4-18: Digitalisering av strømningslinjer (rød) og elvelinjer (blå).	53
Figur 4-19: Illustrasjon av elveløp og blokkerte hindringer.	54
Figur 4-20: Fullstendig blokkering av vannvei (Brunner, 2016).....	54
Figur 4-21: Flere individuelle blokkeringer (Brunner, 2016).....	55
Figur 4-22: Sammenligning konstruksjon av bruer og kulverter (Brunner, 2016).....	57

Figur 4-23: Illustrasjon over tverrsnittene oppstrøms og nedstrøms av kulvert.....	57
Figur 4-24: Layout for tverrsnitt for kulvertmetoden (Brunner, 2016).....	58
Figur 4-25: Visualisering av energiligningen (Brunner, 2016).....	59
Figur 4-26: Relativ usikkerhet tilknyttet vannføringskurver (Engeland et al., 2008).....	61
Figur 4-27: Step 1: Velg kalkuleringspunkt.....	64
Figur 4-28: Step 2: Generer nedbørsfelt.....	65
Figur 5-1: Kart over rett kalkulert nedbørsfelt.....	70
Figur 5-2: Kart som illustrerer hvordan arealet utvides ved feil plassering av punkt.....	72
Figur 5-3: Før og etter kutting av tverrsnitt.....	73
Figur 5-4: Før og etter forbedring av tverrsnitt.....	74
Figur 5-5: Oversikt over tverrsnitt før og etter forbedring.....	75
Figur 5-6: Tverrsnitt før og etter endring av høyde.....	75
Figur 5-7: Illustrasjon av tverrsnitt før og etter kulvert.....	76
Figur 5-8: Illustrasjon av kulvert med dataeditor.....	76
Figur 5-9: Oversikt over konstruerte kulverter i elveløpet.....	77
Figur 5-10: Deck/Roadway Data Editor.....	78
Figur 5-11: Justert tverrsnitt etter endring av bankstations.....	78
Figur 5-12: Illustrasjon over Høyre- og Venstre bankstation og hovedkanal.....	79
Figur 5-13: Valg av bankstation med flere dype områder og illustrasjon av blokkerte hindringer.....	80
Figur 5-14: Oppsett av layer i RAS-mapper.....	81
Figur 5-15: Rasterization 20 versus 1.....	82
Figur 5-16: Resultatfiler fra Ras-mapping.....	82
Figur 5-17: Valg av ulike profiler for vannoverflate.....	83
Figur 5-18: Resultat av Inundation mapping med grensepolygon, bankpoints og tverrsnitt. I tillegg et rasterlag med vanddybde.....	84
Figur 5-19: Flomutbredelse 10-årsflom.....	85
Figur 5-20: Flomutbredelse 200-årsflom.....	86
Figur 5-21: Flomutbredelse 200-årsflom med forbedret tverrsnitt.....	87
Figur 5-22: Flomutbredelse 200-årsflom med forbedret tverrsnitt og grid.....	88
Figur 5-23: Masser avsatt under nedbørshendelsen i Juli 2017.....	89
Figur 5-24: Vannets utbredelse under nedbørshendelen i Juli 2017 (gd, 2017b).....	90
Figur 5-25: Flomutbredelse 200-årsflom med blokkerte kulverter og forbedret tverrsnitt.....	91
Figur 5-26: Flomutbredelse 200-årsflom med blokkerte kulverter, forbedret tverrsnitt og grid.	92
Figur 5-27: Skade oppstrøms av kulvert i Ysterivegen.....	93
Figur 5-28: Skader på stikkvei fra Ysterivegen.....	94
Figur 5-29: Masser avsatt oppstrøms av kulvert under nedbørshendelsen i Juli 2017.....	95
Figur 5-30: Opprinnelig ønsket nedbørsfelt.....	96
Figur 5-31: Editor for tverrsnitt.....	96

Formelliste

Formel 3-1: Vannbalanseligning for distribusjon av vann i et hydrologisk system (Gilli et al., 2012).	13
Formel 3-2: Den rasjonale formel (Stenius et al., 2015).	14
Formel 3-3: Ligning for momentum (Brunner, 1996).	19
Formel 3-4: Ligning for Newtons andre lov for bevegelse (Brunner, 1996).	19
Formel 3-5: Ligning for estimering av transporten i kolonner (Brunner, 2016).	20
Formel 3-6: Ligning for Mannings tall (Lysen, 1972).	21
Formel 3-7: Ligning for elveenergi (Fergus et al., 2010b).	30
Formel 4-1: Ligning for tidsforskjellen mellom utsendt og mottatt signal (Nelson et al., 2009).	31
Formel 4-2: Ligning for beregning av ukjent punkt (Longley et al., 2005).	43
Formel 4-3: Ligning for beregning av gjennomsnitt for de kjente verdiene i invers vektet distance (Longley et al., 2005).	44
Formel 4-4: Beregning av cellestørrelse (McCullagh, 1988).	44
Formel 4-5: Ligning for beregning av kontraksjon og ekspansjon (Brunner, 2016).	51
Formel 4-6: Standardstegsmetoden (Brunner, 2016).	59
Formel 4-7: Ligning for tapt energi (Brunner, 2016).	60
Formel 4-8: Ligning for å beskrive relativ usikkerhet på lavvannføring (Engeland et al., 2008).	61
Formel 4-9: Formel for utregning av konsentrasjonstid (Stenius & Glad, 2015).	63
Formel 4-10: Formel for utregning av konsentrasjonstid i urbane strøk (Stenius & Glad, 2015).	63

Tabelliste

Tabell 4-1: Beskrivelse av analyseprosessen fra LAS-datasett til kartlagte flomsone.	46
Tabell 4-2: Verditabell over elvesystemet.	47
Tabell 4-3: Verditabell for strømningslinjer.	52
Tabell 4-4: Verditabell for banklinjer.	53
Tabell 4-5: Arealbruk, beskrivelse og Mannings n -verdi.	55
Tabell 4-6: Tabell over LUManning.	56
Tabell 4-7: Manning.	56
Tabell 4-8: Klassifisering av datakvalitet (Engeland et al., 2008).	62
Tabell 4-9: Step 4: Genererte feltparametre.	66
Tabell 4-10: Step 5: Genererte indekser.	67
Tabell 5-1: Flomfrekvensverdier basert på riktig plassert punkt.	69
Tabell 5-2: Vannføringsindeks, klima og feltparametre basert på plassert punkt.	70
Tabell 5-3: Flomfrekvensverdier basert på feil plassering av punkt.	71
Tabell 5-4: Vannføringsindeks, klima og feltparametre for feilplassering av punkt.	71
Tabell 5-5: Gjentakintervall og vannføring (m^3/s).	83

Forkortelser

ArcMap	Programvare for Geografisk informasjons behandling
DEM	Digital Elevation Model
ESRI	Environmental System Research Institute
FKB	Felles kartdatabase
GIS	Geografisk Informasjonssystem
HEC-RAS	Hydrological Engineering Center – River Analysis System
IDW	Inverse Distance Weighting
LAS	Log ASCII Standard File format
LiDAR	Light Detection and Ranging
Nevina	Nedbørsfelt- og vannføringsindeksanalyse
NIFS	Naturfare Infrastruktur Flom Skred
NGU	Norges Geologiske Undersøkelse
NN54	Norge Normal Null 1954
NVE	Norges Vassdrags- og Energidirektorat
MET	METeorologisk institutt
SFKB	Sentral felles kartdatabase
TIFF	Tagged Image File Format
TIN	Triangulated Irregular Network
UTM	Universal Transverse Mercator
WGS 1984	World Geodetic System 1984

1 Innledning

I dag lever vi i et klima som er i stor forandring, og sannsynligvis er den største årsaken for dette menneskeskapt klimagassutslipp. Et resultat av dette vil være flere og kraftigere nedbørshendelser, noe vi har opplevd flere ganger i løpet av de siste årene i Norge. Det er særlig Gudbrandsdalen og Vestlandet som opplever de kraftigste konsekvensene av dette. Av værrelaterte hendelser er styrtflom en av dem som skaper kraftigst ødeleggelser på infrastruktur og bebyggelse. Årsaken til dette er at det er svært vanskelig å varsle hvor, når og hvilke nedbørmengder som vil treffe et bestemt område (NIFS, 2013; Vatne, 2013).

For å kunne håndtere situasjoner med massiv nedbør over en kort periode er det derfor viktig å få bedre kunnskap om hvor overflatevannet vil renne i terrenget. En metode for å finne ut av dette er gjennom geografiske informasjonssystemer (GIS) og hydrologiske analyser, hvor den enkle konklusjonen er at vannet vil følge de laveste sporene i terrenget. Det er i flere tilfeller benyttet GIS-modellering for å finne ut hvor i terrenget vannet vil samle seg opp ved vei og jernbane. Gjennom høydemodeller baserer modellen seg på forskjellige klimasituasjoner og på den måten kan en vise hvordan hydrologiske GIS-modeller kan brukes for å forhindre store skader på vei og jernbane ved ekstremvær (Olsen, 2014; Mie et al., 2012). Det økende antall mennesker på jordkloden fører til at vi hele tiden må ta i bruk nye områder for bebyggelse og annen type infrastruktur. Dette fører til at vi må bygge i områder som vi tidligere har ansett som for utsatte for ekstreme værhendelser, herunder skred eller flom. Ved å ta i bruk analyser og forskning vil problemene kunne løses på mest mulig hensiktsmessig måte (Knox, 1977). Olje- og energidepartementet kom i 2012 med stortingsmelding 15 ”Hvordan leve med farene – om flom og skred”, formålet med rapporten var å synliggjøre flom og skred som voksende farer for Norges befolkning og landets infrastruktur. Skred og flom, i tillegg til storm er i historisk sammenheng de naturfenomenene som skaper størst skade på befolkning og bebyggelse (Berthelsen, 2012).

I forbindelse med to store flomhendelser i 2011 og 2013 opplevde Gudbrandsdalen store skader på infrastrukturen grunnet flom og skred. I dalens bratte sider går det både vei og jernbane. Områdene rundt består av både jordbruksareal, skog og berg, noe som fører til at disse ligger ekstra utsatt for skred og utglidninger i dalsidene. Etter de to hendelsene har myndighetene satt større fokus på håndtering av vann i vassdrag som drenerer under vei og

jernbane. I stor grad er det nødvendig med feltundersøkelser for å kunne få en god forståelse av hvordan menneskelige inngrep spiller inn på avrenning og materialtransport i nedbørsfeltet (NIFS, 2013). Økt kunnskap om skred- og flomhendelser langs infrastruktur er viktig for å kunne forstå hvordan menneskelige inngrep påvirker dreneringsveier og stabiliteten. Ved å øke kunnskapen rundt sikring mot naturfarer som skred og flom vil det oppbygges en mer robust infrastruktur, og en redusert risiko for skader som er forårsaket av skred og flom. Gjennomføringsevnen av gode tiltak mot skred- og flomskader avhenger av kartlegging av skadene, flomveiene og årsakene til hendelsene (Knox, 1977).

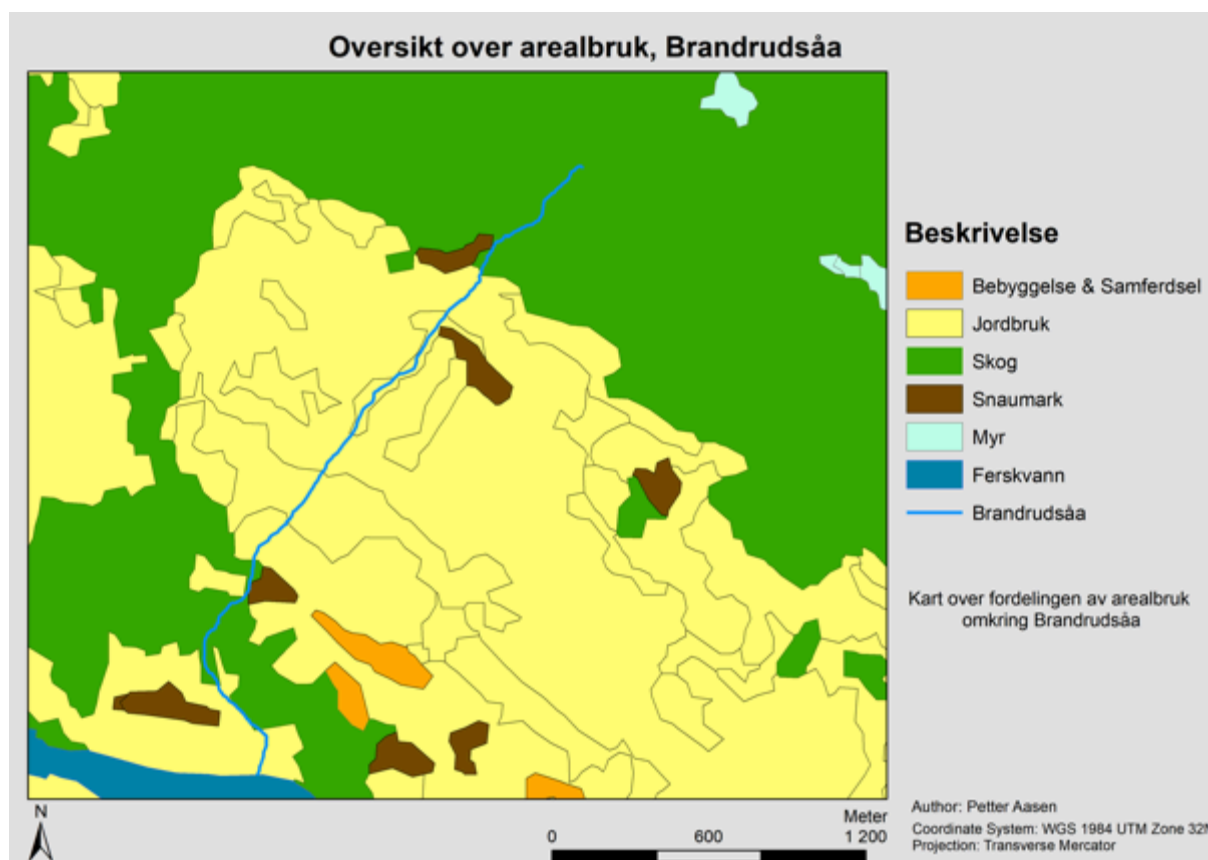
Utgangspunktet for denne masteroppgaven er å finne ut hvor vannet drenerer/avrenner under en flom av en gitt størrelse. Er det gjennomførbart å foreta flomberegninger for umålte felt, der en ikke har vannføringsdata for gjennomføring av frekvensanalyser. Kan det brukes estimater av tidligere nedbørshendelser, og deretter gjennomføres en nedbørs-avløpsmodellering ved hjelp av den rasjonale metode eller andre forenklede modeller? Dette vil i tilfelle gjøre det mulig å gjøre en hydraulisk modellering der en går fra vannføring til vannstand/vannlinje.

Gjennom undersøkelser har det blitt funnet to programmer som vil bli testet i denne masteroppgaven. Nevina som er utviklet av NVE kan gjennomføre flomberegninger av umålte felt. Den hydrauliske modelleringen kan gjennomføres av programmet HEC-RAS utviklet av US Army Corps of Engineers. Horrit & Bates (2002) har konkludert med at HEC-RAS har en stor evne til å respondere på vannutstrekning og konsentrasjonstid etter sin flommodellering av elva Severn, UK. I norsk sammenheng er det Tveiterå (2016) som er nærmest metodisk det som er tenkt for denne oppgaven. Nevina har her blitt brukt for generering av flere nedbørsfelt for analyser av stikkrenner. Problemstillingen vil derfor være som følgende:

Hvordan kan Nevina fungere som et tilleggsprogram for HEC-RAS i en forbedret flomanalyse av en Norsk fjellelv i et klima i forandring? Og hvordan vil analysen samsvare med den virkelige hendelsen som fant sted i juli 2017.

2 Områdebeskrivelse

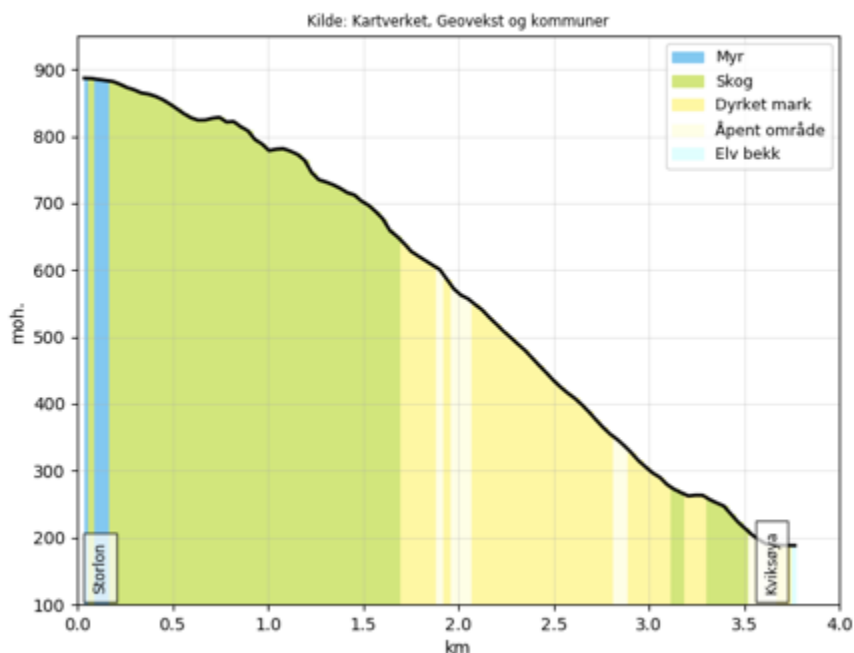
Elva Brandrudsåa ligger omtrent 2 kilometer Nord-Vest for Hundorp i Gudbrandsdalen. Elvene i området renner i bratte dalsider der elvene har erodert seg ned i berget, noe som ikke er ikke tilfelle for Brandrudsåa og er derfor en viktig årsak til flomhendelsene i elva. Nedbørsområdet til elva er på ca. 7 km², der området i stor grad er preget av jordbruk, deriblant beiter og åkerlapper. De midterste delene av området er preget av skog. Det øverste området består av spredt bebyggelse, mens de nedre delene består av tettbygd bebyggelse. Av større infrastruktur passerer jernbanen, gamle E6 og nye E6 gjennom området. Den store variasjonen i arealbruk fører til at Brandrudsåa er et interessant område for en slik studie. De store jordbruksområdene oppstrøms og variasjonen av både asfalterte og gruslagte veier nedstrøms i feltet fører til stor påvirkning på avrenningen. En oversikt over områdets arealbruk vises av figur 2-1.



Figur 2-1: Oversiktskart over arealbruk i området rundt Brandrudsåa (Nibio, 2018).

Brandrudsåa her en sør-sør-vest helning. For Brandrudsåa er det blitt kalkulert en gjennomsnittspersent på 23,9 prosent, der denne er basert på høydeprofilen fra Norgeskart (Figur 2-2):

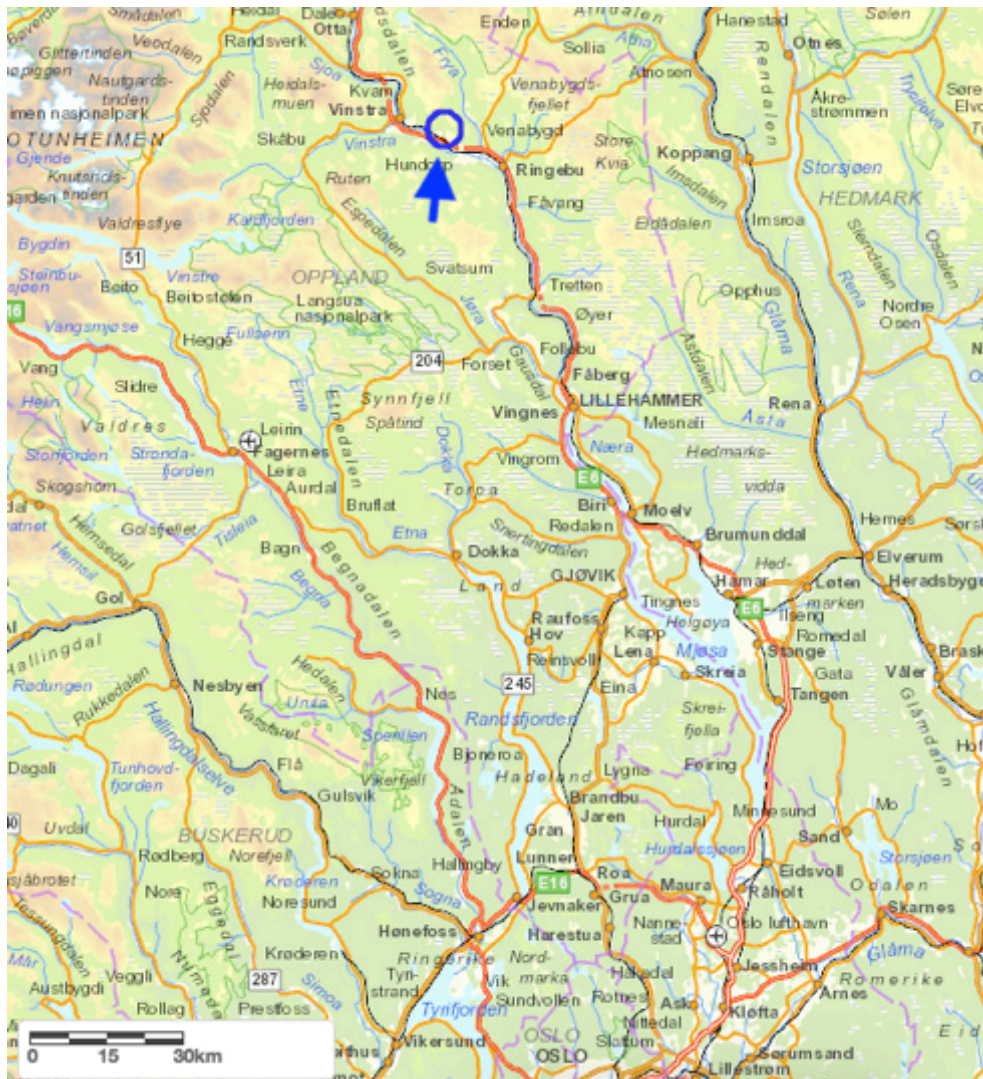
$$\frac{892 \text{ m}}{3730 \text{ m}} \times 100 = 23,9 \text{ prosent}$$



Figur 2-2: Høydeprofil over Brandrudsåa (Norgeskart, 2018).

Brandrudsåa har flere sideelver som renner inn i elva, før den har sitt utløp i Lågen. Gudbrandsdalslågen har de siste syv årene opplevd flere store flommer, der de største fant sted i 2011 og 2013. Gudbrandsdalslågen har sitt utspring ifra Lesjaskogsvatnet i vest og renner ut i Mjøsa i sør. Elvas viktigste tilløp er Otta, Sjøa, Vinstra og Gausa, i tillegg til de små sideelvene som renner ut i Lågen fra Lesjaskogsvatnet til Lågens utløp i Mjøsa (SNL, 2017).

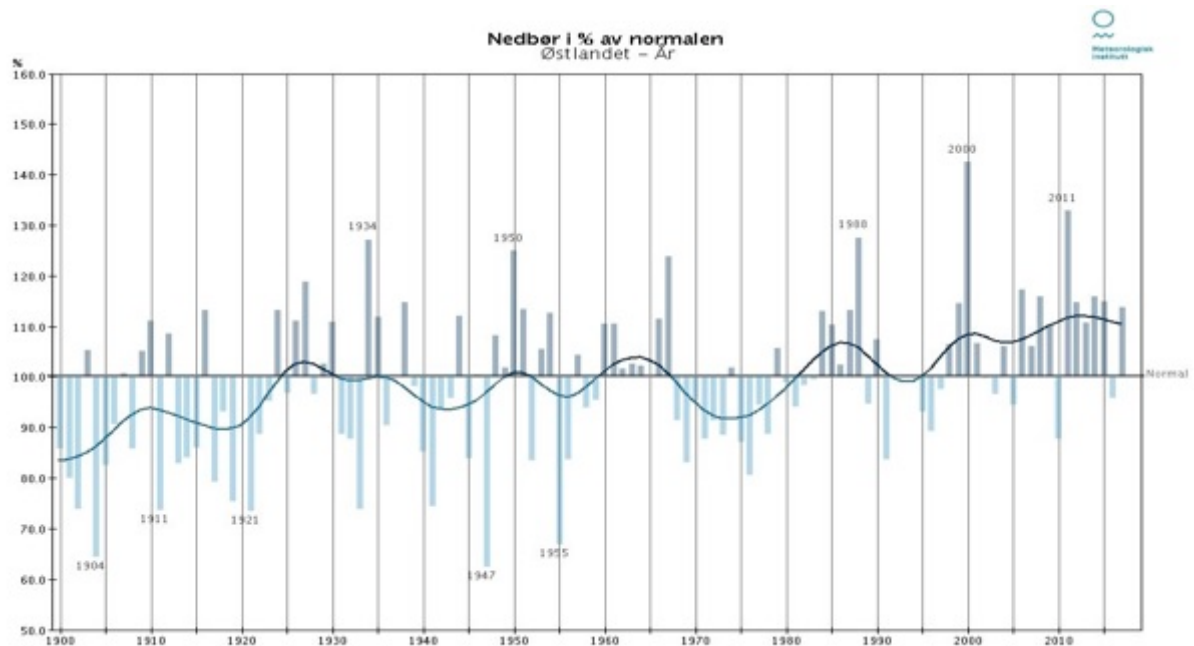
Et av stedene som har blitt hardest rammet av flomhendelsene i 2011 og 2013 er Kvam. Derfor ble det etter flommen i 2013 besluttet å gjennomføre omfattende sikringsarbeider som skal begrense skader på infrastruktur og bebyggelse (NRK, 2013). Våren 2017 var den siste av totalt to bunnlastsperrer ferdig i elva Veiklåa. En bunnlastsperre er en type demning som skal stoppe sedimentene, men som skal slippe gjennom vannet. Demningen har kapasitet til å stoppe 100 000 kubikkmeter med masse og er 12 meter høy og 150 meter lang. Demningen er konstruert for å kunne håndtere en 200-årsflom. Et gjentakende problem under vårflommene er at elvebunnen blir raskt fylt opp av bunnslam, trær, sand, etc., noe som fører til vann på avveie og resulterer i store skader på både infrastruktur og bebyggelse (NRK, 2017).



Figur 2-3: Analyseområde indikert med blå sirkel. (InnlandsGIS, 2018).

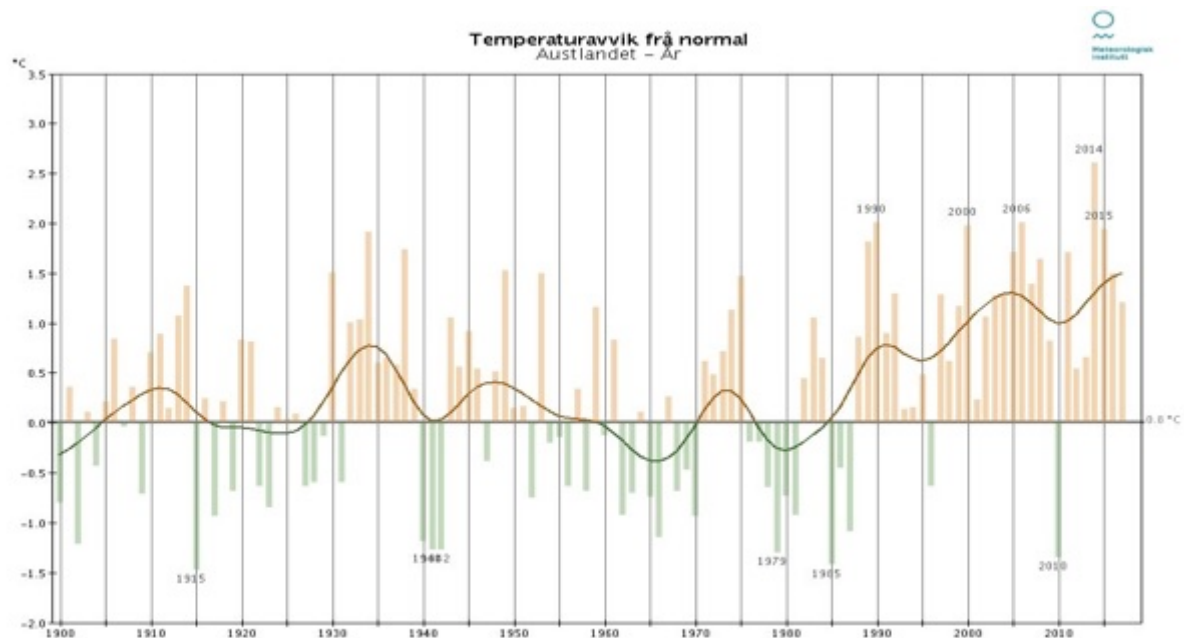
2.1 Klima

I framtiden vil klimaendringene være en viktig forutsetning for både regional, men også for lokal arealplanlegging. Årsaken er endringer i nedbørsmønster, vindforhold, frekvenser av skred og hyppighet av flom for å nevne noen. Dette vil være med på å legge føringer for hvordan boliger og infrastruktur bygges. Områder som i dag er attraktive for boligutvikling, kan i framtiden bli utsatt for forskjellige store hendelser, derfor er det viktig å ha gode arealplaner som tar hensyn til dette. I arealplanleggingen er det viktig med gode kartlegginger over hvilke områder som kan være ekstra sårbare i fremtiden. Økt nedbør og fuktighet bidrar til forsterket belastning på materialer og konstruksjoner på kort og lang sikt, noe som kan redusere byggenes levetid. Med mer vind og regn kan det oppstå fuktskader som har negative helsemessige virkninger, men også føre til kostbare reparasjoner for huseier. Derfor er det viktig at kommunene og aktørene i bolig- og byggesektoren har tilgang på lokale klimadata, i tillegg til god kompetanse om klimatilpasset byggevirksomhet (Regjeringen.no, 2008).



Figur 2-4: Hvordan har nedbøren endret seg for Østlandet i % fra 1900 til 2017 (MET,2018).

Det har fra 1990 vært en klar økning i normal årsnedbør på Østlandet, der toppårene for nedbør var 2000 og 2011. I figur 2-4 indikerer den blå streken en tydelig oppsving i nedbørprosent fra 1995 og denne har stabilisert seg på rundt 110 %. Denne grafen indikerer at klimaet på Østlandet har blitt våtere (Met, 2018).



Figur 2-5: Temperaturavvik fra normalen for Østlandet for 1900–2017 (Met.no, 2018).

Temperaturavviket fra normalen har hatt en markant økning siden 1985, hvor toppåret var 2014 med et temperaturavvik på omkring 2,5 °C. Året 2017 hadde et avvik på rundt 1 °C fra normalen. Avviket fra denne trenden finner vi i 2010, som skiller seg ut gjennom de siste 17

årene. 2010 hadde et avvik på $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. I tillegg til økt nedbør, vil det oppleves kraftigere svingninger i temperatur. Ofte vil det heller være $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ om vinteren og mer tørke om sommeren. Fra år 1900 har nedbøren i Norge økt med 20 %, økningen vil sannsynlig fortsette til 30 % innen 2100 (Met, 2018).

Klimaendringene lokalt i Oppland vil føre til store behov for tilpasning i forhold til kraftig nedbør og økte overvannsproblemer. Klimaprofil oppland, utarbeidet av Norsk klimaservicesenter, skal danne grunnlag for kunnskap og være et hjelpemiddel i overordnet planlegging. Store deler av innholdet i klimaprofil oppland er hentet fra ”Klima i Norge i 2100”. De mest sentrale funnene i klimaprofilen innebærer en økning i årstemperaturen på omkring $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, i tillegg vil årsnedbøren øke med omtrent 20 prosent. Det er viktig å ta med seg at nedbørintensiteten øker på dager med kraftig nedbør, og at dager med mer nedbør kommer hyppigere (Hanssen et al, 2015). Oppland preges av et kontinentalt klima som inneholder kalde vintre, og der dalførene preges av varme somre og er relativt nedbørfattige. I fjellområdene er somrene stort sett kjøligere og mer nedbør oppleves. Oppland opplever mest nedbør i sørøst, der det kan komme nedbørsmengder opp mot 700 mm i året (Ibid).

Gradvis mindre snø vil resultere i lavere snøsmelteflommer, og i stedet vil det forekomme økte regnflommer. Lokal, intens nedbør kan øke sannsynligheten for flom i tettbygde strøk. For oppland er det vanlig at de snøsmelteflommene med størst omfang oppstår på våren eller tidlig sommer. Kommer det i tillegg regn i den samme tidsperioden vil flommene kunne bli større, i slike tilfeller vil små og bratte fjellelver forårsake mest skade. En av årsakene til at Gudbrandsdalen opplever store skader etter flom er at mange tettsteder og byggefelt er anlagt på skredvifter og elvevifter rundt små og store elver. Dessuten er det utfordrende å ha betydelig bebyggelse langs små bratte, og masseførende sidevassdrag (Met, 2016).

Mot 2100 vil Oppland forvente en økt gjennomsnittlig årlig vannføring, som konsekvens av økt nedbør. Vannføringen vil bli påvirket av den økte temperaturen gjennom året fordi den har innvirkning på akkumulasjon og smelting av snø, samt fordampning. Nedbør vil gjennom vinteren komme som regn i større grad enn tidligere, og gi økt vannføring i vassdragene mot 2100. Det er viktig å ta med seg at snøsmelteflommene vil komme tidligere og være mindre enn før. Økte nedbørsmengder i uregulerte vassdrag som har store flommer i dag, vil i framtiden få større flommer. Dersom det utføres flomberegninger og det opparbeides flomsonekart kan det påregnes en 20 % økning i gjennomsnittlig vannføring (Ibid).

2.2 Tidligere hendelser

Gudbrandsdalen har de siste årene blitt truffet av flere mindre og større flommer, men det er flommene som fant sted i 2011 og 2013 som er viktige i denne sammenheng. I juni 2011 ble mange steder i Øst-Norge truffet av større mengder nedbør. Tidligere i mai hadde det vært store nedbørsmengder som resulterte i en metning av mark- og grunnvannsmagasinerne. Totalen av dette førte til en stor flom i Gudbrandsdalen i tidsrommet 6-12 juni 2011. Flomtoppen var mellom 11-12 juni, selv om de største skadene som et resultat av at sidevassdragene i dalsidene gikk over sine bredder, disse skadene fant bare sted mellom kvelden den 10 og morgenen den 11. De nordligste delene av Gudbrandsdalen var de områdene som ble hardest rammet med tanke på skadeomfang (Sellevoid & Edvardsen, 2013).

I 2013 rammet en ny flom Gudbrandsdalen, men under denne hendelsen var det de sørligere delene av dalen som ble rammet hardest. I løpet av noen få dager ble infrastrukturen i området hardt rammet av skader. I følge Sellevoid & Edvardsen (2013) og Olsen et al., (2015) ble området truffet av mye nedbør, men ikke nok til å kalle det ekstremnedbør, og i dette tidsrommet, 21-22. mai, kom den største delen av nedbøren. De største skadene omfattet infrastruktur og bebyggelse grunnet vann på avveie og førte til en beskrivelse av flommen som en ekstremhendelse. Jernbanen var nødt til å utbrede skader ved 300 punkter og som resulterte i utgifter på om lag 300 millioner kroner (Svingheim, 2013).

I masterområdet ble det i 2011 og 2013 observert flere tette dreneringskanaler, samt flere skred og utglidninger i Brandrudsåa (Sellevoid & Edvardsen (2013)). Grunnet de store jordbruksarealene oppstrøms i elva resulterte dette i en stor sedimenttransport fra disse områdene og det ble observert erosjon nedover veiene. De tette stikkrennene førte til store skader på veinettet, og i særlig grad veiene nederst i området, samt at flere eiendommer ble skadet av vann på avveie. Samtidig ble det avsatt store mengder løsmasser i de flatere områdene, der dette påførte store skader på E6 og jernbanen (Olsen et al., 2015).

Mellom 23-24. juli 2017 skapte store mengder regn skader i Gudbrandsdalen og flere andre steder i landet. Uvær og store nedbørsmengder resulterte i stengte veier, skader på gårdsplasser og overvann flere steder, der blant annet E6 ble stengt grunnet overvann (Gd, 2017b). Meteorologisk institutt målte ved Fåvang 28,3 mm nedbør på en time (Ibid), totalt for hendelsen kom det flere steder mellom 70-80 mm nedbør i løpet av et døgn (rbnett, 2017; Gd,

2017a). Sør-Fron kommune var blant de stedene som ble rammet hardest, der flere bekker gikk over sine bredder, noe som resulterte i erosjon og materialavsetning flere steder. Blant de stengte veiene var Eksisvegen som går gjennom masterområdet (Gd, 2017a). Under nye E6 går det en kulvert med to løp som er dimensjonert for 200-årsflom, men under hendelsen gikk begge rørene tett på grunn av den store massetransporten i Brandrudsåa. For å ha mulighet til å åpne opp igjen denne var det nødvendig å fjerne flere titalls kubikk med masse (Sør-Fron, 2017). Resultatet for hendelsen ble store skader forårsaket av styrtregn (Ibid).

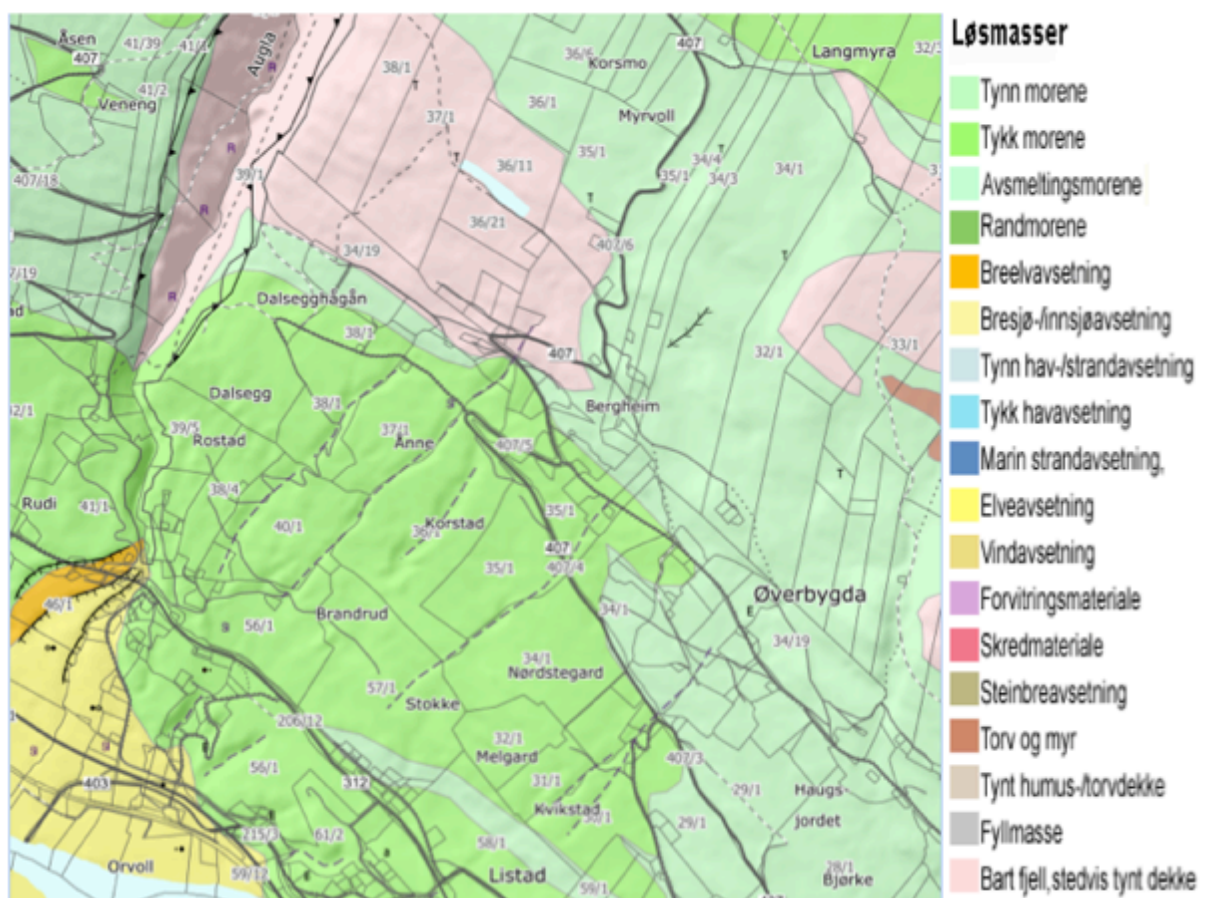
2.3 Kvartærgeologi

Den kvartære tidsperioden varte mellom 2.588 millioner og til i dag. Perioden deles inn i to epoker, Pleistocen og Holocen, henholdsvis 1,8 millioner år til 10 000 år siden frem til i dag (SNL, 2009). Tidsalderen ble preget av flere istider (glasialer) og mellomistider (interglasialer). En istid deles inn i to ulike perioder; kalde faser (stadialer) og varme faser (interstadialer). De varme periodene mellom to istider blir beskrevet som en mellomistid eller interglasial tid (Jørgensen, et al, 1997). Perioden ble kaldere og kaldere men ble avbrutt av en varmere periode. Den varme perioden ble avbrutt av mellom-Weichsel som var en kald periode. Denne perioden og sein-Weichsel ble delt av en interstadial. Svendsen et al., (2016) konkluderer med at isdekket som bredte seg ut over Skandinavia hadde sin største utbredelse under sein-Weichsel for om lag 20 000 år siden.

De fluviale prosessene som fant sted før de kvartære glasiasjonene har formet Gudbrandsdalen og dens sidedaler, der sidedalene ble videreutviklet gjennom kvartær tid på grunn av senkning av Gudbrandsdalen ved glasial erosjon. Gjennom tidsalderen ble Gudbrandsdalen flere ganger fylt av is, og smeltingen førte til dannelse av ulike landformer. Langs de regionale skandinaviske fjellene dannet det seg et kjerneområde av is, der denne spredte seg utover Skandinavia gjennom de tidligere faser av glasial vekst. I periodene med maksimal utbredelse oppsto det en migrasjon av isskillet i en mer øst-sørøstlig retning. Under denne perioden lå isskillet øst-sørøstlige posisjon sør for Vinstra. Som følge av den glasiale erosjonen ble Gudbrandsdalen senket, noe som resulterte i brattere dalsider. De aller fleste sidedalene er i hovedsak fluvialt erodert, med et bratt relieff (Berthling, 2018 pers. medd; Mangerud, 1965).

Sedimentene som ligger øverst og nært overflaten, består som regel av sedimenter avsatt gjennom de sene faser av Weichsel. I Gudbrandsdalen og Innlandet i Sør-Øst Norge, ligger disse avsetningene som et lag over avsetningene som fant sted under tidligere glisiale og interglisiale/interstadiale perioder. Det er ikke funnet pre-weichsel sedimenter i dette område, derimot kan en i dalbunnen se bevis på sandur-materiale som kan stamme fra tidlig Weichsel. Under Weichsel maksimum var de østlige deler av Norge dekket av tykk is, mens de vestlige delene av Sør-Norge lå nærmere marginene til det Skandinaviske dekket. Landskapsmessig har dette resultert i at de vestlige delene av Sør-Norge i dag består av fjorder og alpine fjell. Midt-Norge og Øst-Norge er derimot karakterisert av fjell og daler som har et mer avrundet relieff (Sollid & Sørbel, 1994). Under de sentrale delene av de tykke isdekkene har det blitt avsatt et kontinuerlig sedimentdekke med tykkelser på ofte mer enn fem meter på sletter og 10 meter i små dalfører. I større daler derimot, som eksempelvis Gudbrandsdalen, kan det være sedimenttykkelser på opptil 100 meter, der disse hovedsakelig består av morene (Olsen et al., 2013).

2.4 Løsmassekart



Figur 2-6: Løsmassekart over Brandrudsåa (NGU, 2018a).

Løsmassekartet illustrert i figur 2-6 viser i all hovedsak at feltet består av et tykt morenedekke. Morene er den vanligste løsmassetypen i Norge (Nystuen, 2007). Morenen består av usortert, heterogent og glasialt materiale som blir karakterisert gjennom mineralsk materiale i alle størrelser (Lebourg, Riss & Pirard, 2004). Om det tas et tverrsnitt av et morenedekket vil det komme til syne at det er lite eller ingen lagdeling i materialet, derimot kan en se at blokkene og grusen er kantrundet. Morenesammensetningen avhenger av den lokale berggrunnen, i tillegg til materialeegenskapene. Generelt i Norge er det normalt at morenedekke er tynt, og ofte med en gjennomsnittlig tykkelse på en meter (Nystuen, 2007). Klassifiseringen av en morene blir avgjort gjennom fordeling av størrelse og formen materialet består av (Lebour, et al., 2004).

3 Teori

3.1 Hydrologiske prosesser

Hvordan vannet vil distribueres i et hydrologisk system er av interesse for å oppnå kunnskap om de hydrologiske prosessene i et nedbørsfelt. Distribusjonen av nedbøren vil være summen av vannet lagret i nedbørsfeltet, mengden nedbør som vil bli fordampet via evaporasjon til atmosfæren og avrenningen i nedbørsfeltet. Sammenhengen mellom disse prosessene er vist gjennom vannbalanseligningen.

Formel 3-1: Vannbalanseligning for distribusjon av vann i et hydrologisk system (Gilli et al., 2012).

$$P = Q + ET + \Delta S$$

Hvor:

P = Nedbør.

Q = Uttømming inkludert overflateavrenning og basisstrøm.

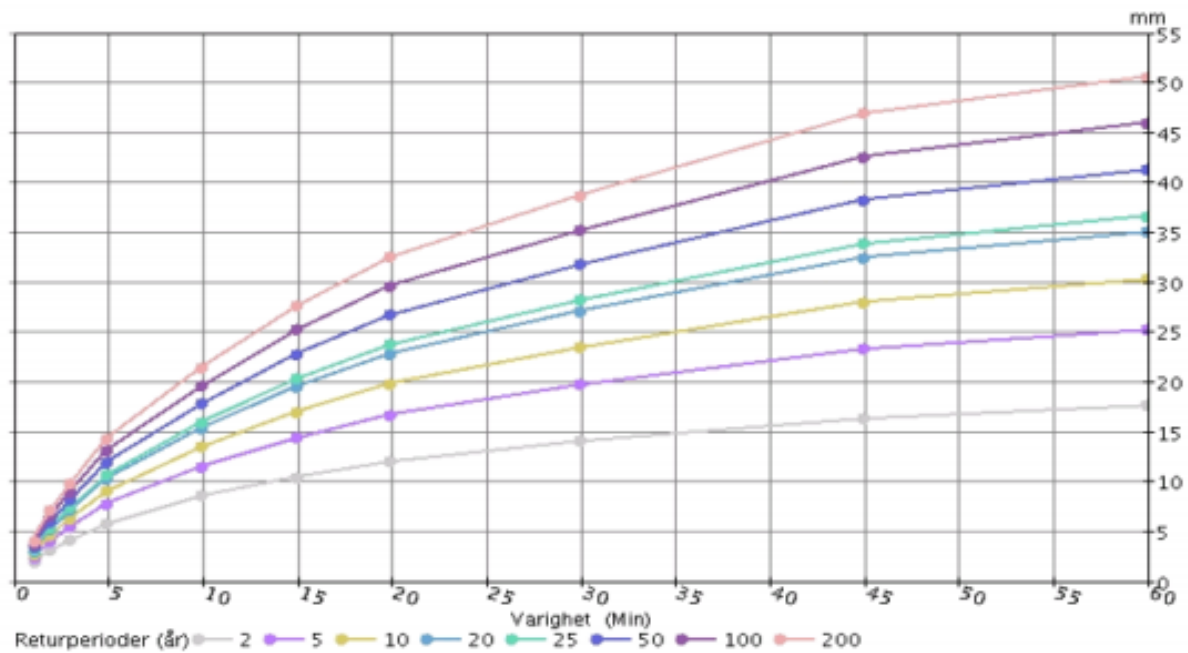
ET = Evapotranspirasjon.

ΔS = Forandringene i vann som er lagret.

For noen naturlige systemer vil deler av nedbøren bli transportert tilbake til atmosfæren gjennom evapotranspirasjon. Infiltrasjon er prosessen når vannet trenger gjennom overflaten, og beskriver bevegelsen under overflaten. Bevegelsen vil avhenge av sedimentstypene som finnes i nedbørsfeltet. Mengden avrenning avhenger av ulike faktorer som vegetasjonsutbredelse og arealbruksdekket som vil ha en sterk effekt på nedbørsfelt med stor andel vegetasjon. I slike tilfeller vil det være en høyere grad av fordampning enn ved nedbørsfelt med lavere grad av vegetasjon. Nedbørsfeltets status i forkant av en nedbørshendelse vil påvirke mengden avrenning, der tørre felt kan oppleve mindre avrenning enn hvis feltet har opplevd nedbør i forkant av nedbørshendelsen. Av de forskjellige parameterne som påvirker et nedbørsfelt vil evapotranspirasjonen være vanskeligst å estimere. Nedbør og avrenning vil være lettere å kvantifisere (Gilli et al., 2012)

3.2 Hydrologiske analyser

Det trengs en grunnleggende forståelse av meteorologi og tilgang på meteorologiske data for utførelse av hydrologiske beregninger ved bruk av nedbør-avløps metoder og empiriske modeller ved bruk av den rasjonale formel. Tradisjonelt har nedbør i Norge blitt målt en eller to ganger i døgnet, men for eksempel ved flomberegninger trengs det målinger med større hyppighet. Noe som gir et estimat av returperioder er Intensitet-Varighet-Frekvens (IVF kurver) for nedbørintensitet med ulik varighet, der denne ofte er brukt ved planlegging og utforming av vår infrastruktur (figur 3-1) (Stenius & Glad, 2015).



Figur 3-1: IVF-kurve for millimeter for 18701 OSLO-Blindern. (Periode 1968-2014) (Stenius et al., 2015).

Vassdragshåndboka (2010) beskriver gjentaksintervall som “Gjentaksintervall er et mål for hvor mange år det i gjennomsnitt er mellom hver gang en bestemt flomvannføring overskrides”. For eksempel vil en 100-årsflom opptre i gjennomsnitt hvert hundrede år om en hadde en uendelig lang tidsserie. Det er altså 1 % sannsynlighet for at en 100-årsflom vil overskride denne størrelsen hvert år, selv om en 100-årsflom kan opptre to år på rad. Nedbør-avløpsmetoden bruker frekvensanalyser av nedbørdata som en input. Nedbørverdiene blir konvertert til flomverdier ved bruk av hydrologiske modeller eller ved hjelp av den rasjonale formel eller tilsvarende formler. Den rasjonale formel blir ofte benyttet til enkle overslag for dimensjonering i små nedbørfelt, og er formet på at det er en direkte sammenheng mellom nedbør og avrenning. Formelen er å anbefale for nedbørsfelt på 2-5 km² (Stenius et al., 2015), men Lindholm (2008) anbefaler at den ikke brukes på større felt enn 0,2 – 0,5 km². Det er viktig å påpeke at den rasjonale formel i hovedsak skal brukes i små felt med tilnærmet null demping (Ibid). Avrenningen Q (m³/s) er gitt ved formel 3-2 (Stenius et al., 2015).

Formel 3-2: Den rasjonale formel (Stenius et al., 2015).

$$Q = C \cdot i \cdot A$$

Hvor:

- C = Avrenningsfaktor (dimensjonsløs).
- i = Dimensjonerende nedbørintensitet fra IVF kurver (l/s/ha).
- A = Feltareal (ha), (100 ha = 1 km²).

Avrenningsfaktoren (C) er uttrykt som den totale nedbørsmengden som i et nedbørfelt renner bort som overflatevann, faktoren er avhengig av arealbruk og andre egenskaper til feltet, derfor bør den endres i forhold til varigheten og gjentaksintervallet til nedbørshendelsen som skal beregnes (Ibid). Det knyttes det en del usikkerheter til de ulike faktorene i formelen. Den største usikkerheten ligger i valg av avrenningsfaktor, der denne sjeldent er uniform for hele analysefeltet. Det blir forutinntatt av formelen at avrenningskoeffisienten er konstant gjennom hele nedbørshendelsen, og dermed tar den ikke hensyn til om grunnen blir mett under hendelsen. Intensiteten til hendelsen vil baseres til å være konstant i tid og rom. (Stenius & Glad, 2015).

Nedbør-avløpsmodellen benytter seg av nedbørsverdier samt ulike parameterverdier for feltet som omgjør nedbørsverdiene til avrenning (Lunde, 2017). I den samme artikkelen blir det skrevet at for små arealer ($<1,5 \text{ km}^2$) vil den rasjonale metoden gi mest representative data (Ibid). Ved bruk av den rasjonale metode vil det gjennomgående estimeres en høyere vannføring enn det som er observert. Et funn i Søndena (2017) er at ved bruk av PQRUT og den rasjonale formel vil dette kun gi et samsvarende gjentaksintervall for nedbør og vannføring i kun 2 av totalt 13 observerte flomhendelser. PQRUT er en nedbør-avløpsmodell som ble utviklet av Andersen et al., (1993) til bruk i flomberegninger. Modellen er en enklere versjon av HBV-modellen (Bergstrøm, 1976) og den beregner avløp for en bestemt nedbørshendelse (Midttømme et al., 2011). Ved lokale nedbørvariasjoner vil dette virke som en aktuell feilkilde i den rasjonale metode. Nedbørsfeltet som brukes i Søndena (2017) er på $3,5 \text{ km}^2$, og konklusjonen er at dette er i overkant stort for den rasjonale metode.

Vassdragets flomforhold vil påvirkes av området klima og de fysiske/geografiske forholdene gjennom vassdraget. For små nedbørsfelt vil det som regel være nedbør som forårsaker flom, og spesielt hendelser med høy intensitet og lav varighet (Styrtflom). De største flommene vil oppstå når regn kombineres med lite gunstige forhold, som kan innebære; snøsmelting, mett mark på grunn av tidligere nedbør, eller gjennom nedbør på frossen mark som resulterer i rask avrenning (Ibid). Er det IVF-kurver tilgjengelig som oppfyller kravene herunder varighet og gjentaksintervall etc. kan flommodulen PQRUT brukes i tillegg til andre metoder. PQRUT er anbefalt brukt i felt med en størrelse på $1-200 \text{ km}^2$. Det knyttes i følge Hisdal (2008) store usikkerheter til faktorene i den rasjonale formel, og her nevnes det at formelen representerer en sterk forenkling av virkeligheten og i spesiell grad faktorene C og i . Faktoren i vil øke om det ikke finnes lokale nedbørmålinger i flomfrekvensanalyser og vil være en usikker faktor.

Det nevnes også at subjektive, skjønnsmessige vurderinger vil være bestemmende for resultatet.

3.3 Hydrologiske studier

Modellering av flomoversvømmelser krever en distribuert modell for informasjon om vanskelige og store avgjørelser relatert til planlegging og forsikringer. De senere år har utviklingen i flommodellering vært stor, der de viktigste grunnene til dette er geografiske informasjonssystemer, nedbørsradar og høyoppløselige høydemodeller. Allikevel er det store problemer med nøyaktigheten av flomvarslinger. Nylige arbeider i flommodelleringer har fokusert på utvikling av effektive verktøyer for bruk i ArcMap. HEC-RAS er utviklet som et tilleggsværktøy i ArcMap og som en integrert del av ulike studier, der disse har ført til konklusjoner om en høy nøyaktighet og nyttige resultater i studier av flommodelleringer. En nedbør-avrennings modell simulerer avrenningsresponsen for et område ved en gitt mengde og distribusjon av nedbør over en definert tidsperiode (Knebl et al., 2005).

Horrit & Bates (2002) har gjennom HEC-RAS flommodellert elva Severn, UK. Her har de brukt 19 tverrsnitt for å dekke elvas bredde og høyden til bunnen. De har brukt 5-10 punkter på hver side av kanalen for å få dekt topografien på en tilfredsstillende måte. HEC-RAS viser her en stor evne til å simulere oversvømmelsesutstrekning og konsentrasjonstid, hvor begge er optimalisert for høye verdier av friksjon. Lav kanalfriksjon eller lav vannstand, vil kunne forårsake små oversvømmelser, og om sensitiveten for flomslettefriksjon er lav. Høyere kanalfriksjon øker vannstanden i elva, og mer vann renner ut over flomslettene, og friksjonen her har en større innvirkning på konsentrasjonstiden og flomutbredelsen. Ved endimensjonale modelleringer i HEC-RAS kan kalibreringen av hydrometriske data føre til tilstrekkelig bruk i forutsigelser av flomutbredelse, om vannet har en fri overflate på en høyoppløselig DEM. I artikkelen blir det konkludert med at HEC-RAS er kapabel til å gi gode forutsigelser med hensyn til område som er oversvømmet, også der modellen er kalibrert mot tidligere hendelser (Ibid).

Flomsonekartlegginger har normalt blitt brukt til å fremstille utbredelsesområder for flommer med spesifikke overskridelser. Usikkerhetene knyttet til grensene for utbredelse er sjeldent kvantifisert, på grunn av at kildene er ukjente, og at tilgjengelig data har usikkerheter ved seg (Bales & Wagner, 2009). Nøyaktig prediksjon av flomsoneområder er nødvendig for utvikling og kvantifisering av rater knyttet til forsikringer i forbindelse med flom.

Flomsonemodelleringer involverer hydrauliske modelleringer for å beregne flomtoppen til overflateavrenning, i tillegg til modelleringer av vanndybde og terrengeanalyse av området for utbredelse (Merwade et al., 2008).

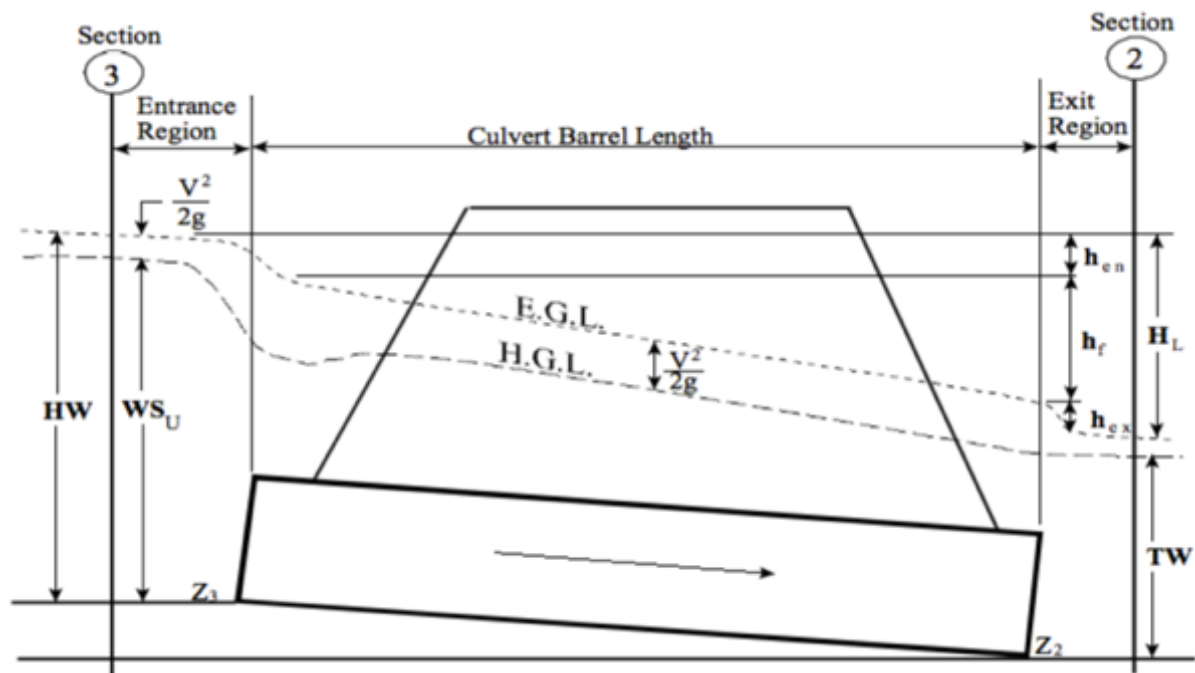
Et høyt antall modellstrukturer har blitt utviklet for å forutsi flomutbredelse. Derimot, tilnærmer hver struktur seg naturen og det har da blitt gjort mange forenklinger (Pappenberger et al., 2005). Selv om topografien er en av de mest validerte parameterne i en hydrologisk analyse er det i flere studier kommet fram til at det også her oppstår små feil, der disse kan ha en stor innvirkning på resultatet (Ibid). Problemet er gjort enda mer kompleks når representasjoner av infrastruktur inkluderes i modellen. Om modellen er mer sensitiv for begge/eller ruheten og geometrien er usikkerheten et resultat av dimensjonaliteten til modellstrukturen, som representerer geometrien på ulike måter (Ibid). Å forandre modellen fra brukerdefinerte polygoner til en GRID/TIN-format som kan kobles til et geografisk informasjonssystem er en relativ enkel underdrivelse, selv om dette kan føre til enklere koding. En forenkling i hydrologiske modelleringer er både bra og dårlig på samme tid (Hunter et al., 2007). Hydrauliske modeller krever en spesifisering av strømmotstand som i teorien skal spesifiseres for hver enkelt celle. Dette er bevist vanskelig å demonstrere at slike parametere er nøyaktige nok for å representere spådommer for single modellrealiseringer (Ibid).

3.4 Beregninger/kalkulasjoner i prosessen

3.4.1 Kulvert-hydraulikk

En kulvert/stikkrenne er en lukket rørledning som kobler sammen to åpne kanaler. De to vanligste kulvertene er: sirkulær og rektangulær (box). Det er nødvendig med en gjennomgang av fem terminologier for å forstå hva som foregår i en kulvert. Kulverter konstrueres med en inngang hvor vannet strømmen inn i kulverten, der den midterste og stengte delen kalles ”tønne” og en utgang der vannet strømmer ut. Den totale vannmengden en kulvert kan håndtere avhenger av de tre elementene nevnt ovenfor. I sammenheng med dybden vann ved utgangen eller nedstrøms kulvert kalles dette ”Tailwater”. Vanndybden blir målt ved nedstrøms kulvert og vanndybden avhenger av vannstrømmen og de hydrauliske forholdene nedstrøms kulvert. ”Invert” er det laveste punkter ved innsiden av kulverten for et gitt tverrsnitt. ”Headwater” beskriver den totale mengden energi som kreves for at en strøm skal flomme gjennom røret. Dybden fra kulvertinngangen (invert) til energigradientlinjen for tverrsnittet ovenfor oppstrøms kulvert beskrives som ”Headwater”, illustrert av figur 3-2.

Oppstrøms vannoverflate beskriver dybden til vannet ved inngang/utgang kulverten, og måles fra oppstrøms kulvert nummer tre, dette illustreres gjennom figur 4-24. Den totale energien ved en gitt lokalitet er lik høyden av "invert" pluss den spesifikke energien (dybden til vannet og hastighet) ved den lokaliteten. Alle kulvertberegninger i HEC-RAS kalkulerer den totale energien oppstrøms av inngang kulvert. Oppstrøms vannoverflate blir i etterkant oppnådd ved å plassere energien inn i oppstrøms tverrsnitt og deretter beregne om vannoverflaten samsvarer med energien for en gitt strømrates (Brunner, 2016).



Figur 3-2: Kulvert-hydraulikk (Brunner, 2016).

3.4.2 Bevegelsesligning

Når en vannoverflate passerer gjennom kritisk dybde, er ikke energiligningen anvendbar.

Derimot er den anvendbar i situasjoner med gradvis endret strøm og overgangen fra subkritisk til superkritisk eller motsatt, situasjoner som beskrives som hurtig endret strøm. Det er flere tilfeller hvor strømmingene går fra subkritisk til superkritisk og fra superkritisk til subkritisk.

Disse sammenfatter forandringer i kanalgradient, brukonstruksjoner og kanalkoblinger. I noen av disse tilfellene har det vært bruk for vitenskapelige ligninger, men ved andre tilfeller er det

nødvendig å bruke bevegelsesligningen i leting etter svar. I HEC-RAS kan

bevegelsesligningen anvendes ved følgende problemer; hendelser av hydrauliske sprang,

lavstrøm-hydraulikk ved bruer og ved kanalkoblinger. For å forstå hvordan

bevegelsesligningen brukes for løsninger av disse problemene kan ligning 3-3 benyttes

(Brunner, 1996). Bevegelsesligningen er utledet fra Newtons andre lov for bevegelse og

anvendelsen av denne blir illustrert gjennom formel 3-3. Kraft = Masse x Akselerasjon (forandring i bevegelse)

Formel 3-3: Ligning for momentum (Brunner, 1996).

$$\sum F_x = ma$$

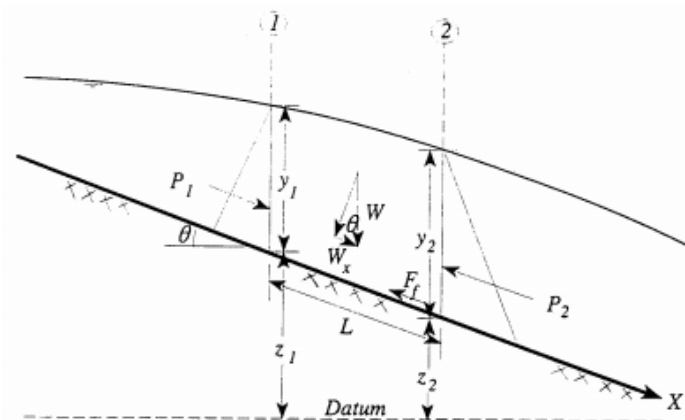
Ved anvendelse av Newtons andre lov for bevegelse av vann innesluttet av to tverrsnitt ved lokalitetene 1 og 2 i figur 3-3. Noe som uttrykkes gjennom formel 3-4 (Ibid):

Formel 3-4: Ligning for Newtons andre lov for bevegelse (Brunner, 1996).

$$P_1 - P_2 + W_x - F_f = Qp\Delta V_x$$

Hvor:

- P = Hydrostatisk trykk ved lokalitet 1 og 2.
- W_x = Krefter grunnet vekten av vannet i retning X.
- F_f = Krefter grunnet utvendig friksjon tap fra 1 og 2.
- Q = Utløp.
- P = Tetthet til vann.
- ΔV_x = Forandring i hastighet fra 1 til 2 i retning X.



Figur 3-3: Anvendelse av prinsipp for bevegelse (Brunner, 1996).

3.4.3 Oppdeling av tverrsnitt for transportkalkulering

Bestemmelsen av koeffisienten for total transport og hastighet for tverrsnittene krever at vannstrømmen blir delt inn i kolonner der hastigheten er lik. HEC-RAS gjør dette gjennom en oppdeling av strømmen ved områder rundt elvebankene gjennom bruk av en n-verdi for knekkpunkter i tverrsnittene som grunnlag for inndelingen av seksjonene. Transporten er kalkulert innen hver kolonne gjennom følgende form av Mannings formel:

Formel 3-5: Ligning for estimering av transporten i kolonner (Brunner, 2016).

$$Q = KS \frac{1}{f}^{1/2}$$

$$K = \frac{1.486}{n} AR^{2/3}$$

Hvor:

K = Transport i kolonnene.

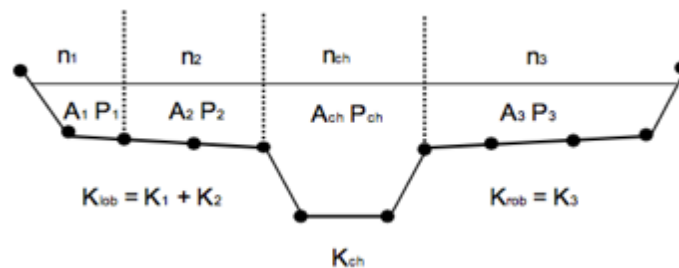
n = Mannings koeffisient for inndeling av ruhet.

A = Strømningsområde for underdeling.

R = Hydraulisk radius for underdeling (område/vått perimeter).

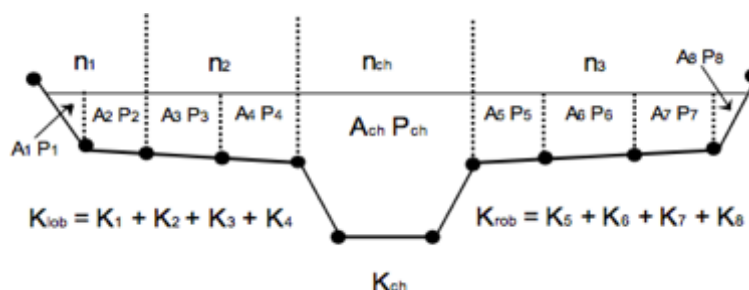
S_f = Helningen til energigradienten (Gradeline).

Programmet summerer de trinnvisene transport-ratene i elvebankene for å beregne transporten for høyre og venstre elvebank. Transporten i hovedkanalen er normalt beregnet gjennom et enkelt transportelement (Venstre, kanal og Høyre).



Figur 3-4: HEC-RAS standardmetode for utregning av inndeling av kolonner (Brunner, 2016).

En alternativ metode tilgjengelig i HEC-RAS for kalkulering er å bruke transporten mellom hvert koordinatpunkt i elvebankene. Transporten blir summert for å få total mengde for venstre og høyre elvebank.



Figur 3-5: Alternativ metode for utregning av inndeling av kolonner (Brunner, 2016).

De ulike metodene for beregning av transport vil gi ulike svar ved forskjellige deler av elvebankene om dem har bakkeseksjoner med betydelige vertikale skrånninger. På generell

basis vil tilvenninger i HEC-RAS gi en lavere totaltransport for de samme vannoverflatene. For å teste de ulike metodene ble det utført 97 ulike datasett for å finne ut nøyaktigheten i HEC-RAS. Overflateprofiler for vann ble beregnet for å ha 1 % sjanse for hendelser ved de to metodene for utregning av transport i HEC-RAS. Resultatene i disse studiene viste at beregningene vil generelt produsere en høyere vannoverflate. Gjennom testene ble det klart at retningen tenderer en vei. Effekten vil tilskrives forplantning i forskjellene nedstrøms. Resultatet fra sammenligningene av transport viser ikke hvilken metode som er mest korrekt, dem viser bare forskjellen mellom de to (Brunner, 2016).

Vannstrømmen i hovedkanalen er ikke inndelt, bortsett fra tilfeller hvor ruhet-koeffisienten forandres innenfor området. Programmet bestemmer om deler av hovedkanalen kan bli inndelt eller om n -verdien til den sammensatte hovedkanalen vil bli benyttet basert ved følgende kriterier: om hovedkanalens skråninger er brattere enn 5H:1V og om hovedkanalen har mer enn en n -verdi, vil den sammensatte ruheten bli beregnet. Kanalens sideskråninger som brukes i HEC-RAS er definert som den horisontale distansen mellom, ved siden av n -verdien til stasjonene innenfor hovedkanalen med høydeforskjellen mellom de to stasjonene (Brunner, 2016).

3.4.4 Mannings Formel

Transportkapasiteten for vann i kanaler eller naturlige elver er avhengig av forholdet mellom friksjonen mot bunnen i elva, tverrsnittet, vannføring og hastighet. Disse parameterne kan beregnes ut fra alle vanlige friksjonsformler for strømning i rør og kanaler, i denne oppgaven vil det bli tatt utgangspunkt i Mannings formel (Lysen, 1972; NVE, 1998). Det er flere faktorer som kan påvirke elvens vannføring, der disse kan være topografi, hydraulisk radius og vegetasjon. For å ta hensyn til dette kan Mannings formel benyttes i analysen. Formelen estimerer vannets strømningshastighet i en elv som har fritt vannspeil, og baseres på en uniform, stasjonær strømning. Uniform strøm innebærer at bredde og dybde er konstant langs retningen for strømningen. Ved stasjonær strømning er vannstanden på et bestemt sted i elva konstant, og endres ikke over tid (NVE, 1998). Mannings tall er basert på en ruhetskoeffisient (n), der Manningstallet (M) og ruhetskoeffisienten (n) er knyttet sammen ved:

Formel 3-6: Ligning for Mannings tall (Lysen, 1972).

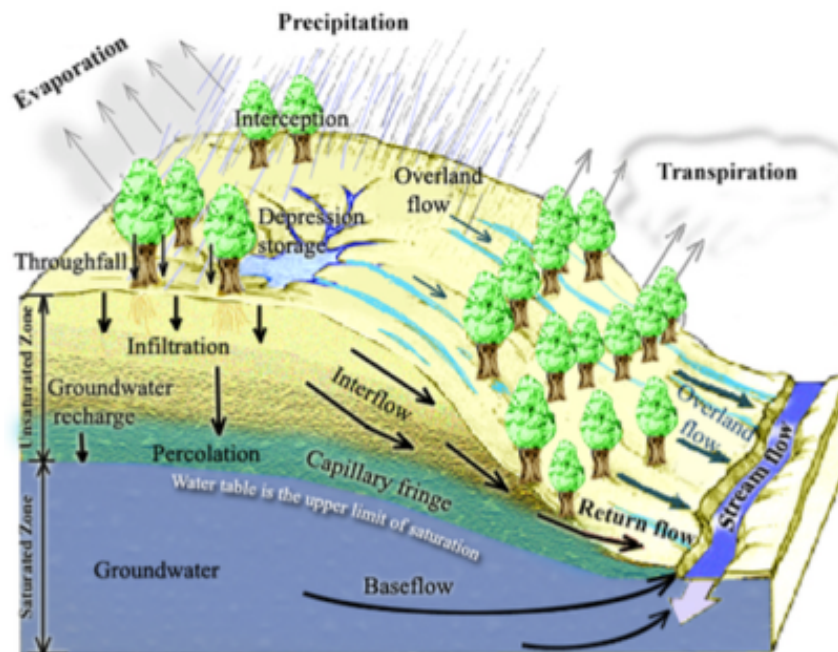
$$M = \frac{1}{n}$$

Koeffisienten (n) er empirisk tenkt og forklart som friksjonen mellom vannet, elvebunnen og elvekantene, og ved glatte kanaler uten hindringer vil vannet kunne strømme fritt. Naturlige

vassdrag vil ha en elvebunn bestående av sprekker, steiner og andre faktorer som påvirker vannets strømmingsevne. Valg av Manningstallet kan påvirkes av sesongvariasjoner med lite og mye vegetasjon og skiftende vannstand. Vannstanden er med på å påvirke Manningstallet på grunn av at ved full vannføring vil vannet være i kontakt med hele elvebunnen. Derfor vil Manningstallet være ulikt fra elv til elv, i tillegg kan det være forskjeller innad i samme elv (NVE, 1998).

3.5 Overflateavrenning

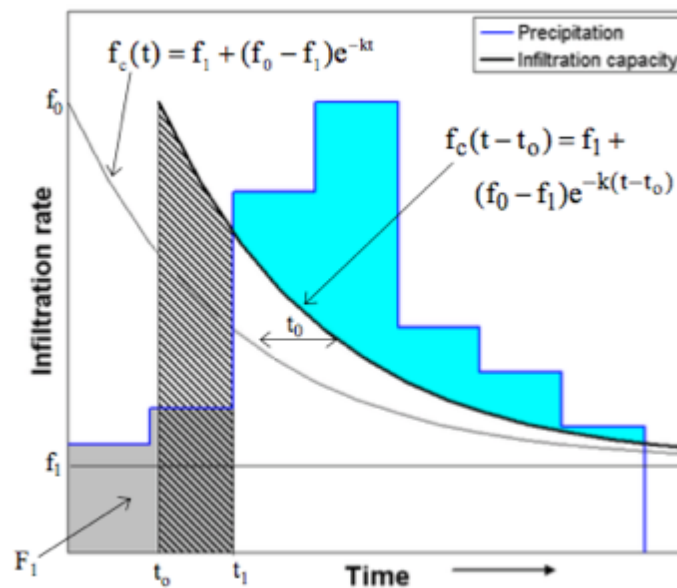
Overflateavrenning blir definert som vann i bevegelse på jordoverflaten, og vil oppstå når nedbørratene eller nedbør- og overflateavrenningsraten overstiger jordas kapasitet for infiltrasjon (Istanbullouglu & Bras, 2006). Infiltrasjon er beskrevet som prosessen når vann trenger inn i jorda gjennom jordoverflaten og her defineres infiltrasjonskapasiteten som det maksimale volumet vann som kan sige ned i, eller absorberes av jorda pr tidsenhet (Cerdá, 1995). De fysiske prosessene som er involvert under avrenning illustreres i figur 3-6.



Figur 3-6: Fysiske prosesser involvert i avrenningsprosesser (Tarbaton, 2003).

Hortonian overflateavrenning er produsert gjennom tilgang på nedbør (overskridelse av infiltrasjonskapasiteten ved ekstrem nedbør). Årsaken til dette er at verken intensiteten for nedbør eller infiltrasjon varierer stort gjennom små nedbørsfelt. Hortonian overflateavrenning blir tenkt fordelt over hele nedbørsfeltet (Pearce, 1975). Hvordan vanntilgang og infiltrasjon påvirker avrenning blir illustrert av grafen i figur 3-7. I etterkant av nedbør kan strømmingskonsentrasjonen i riller og små kanaler gi en reduksjon i det effektive

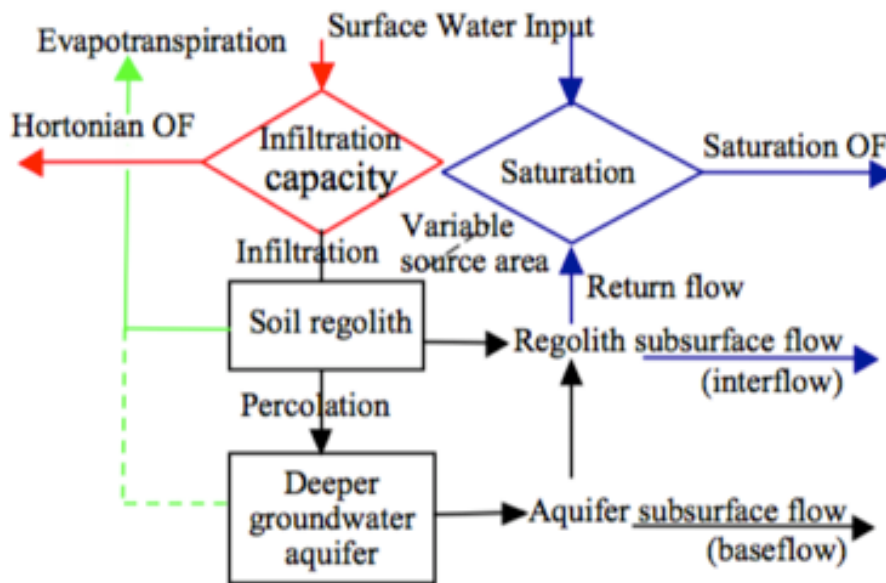
infiltrasjonsområdet. Reduksjonen i det effektive infiltrasjonsområde vil påvirke volumnedgangen, herunder tid og volumtopper (Woolhiser et al., 1996).



Figur 3-7: Vanntilgang, infiltrasjon og avrenning ved bruk av Hortons infiltrasjonsligning (Tarbaton, 2003).

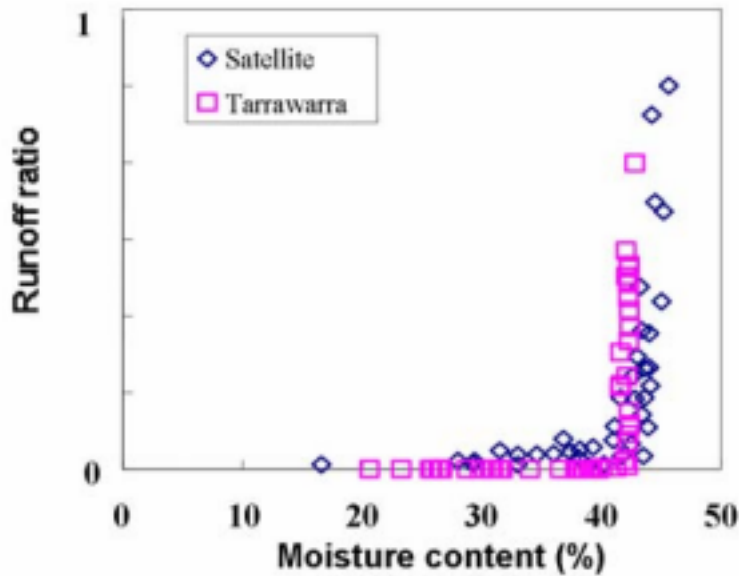
Pearce (1975) mener at mettet overflateavrenning kan forklares som resultatet av lokal, midlertidig metning av jordprofilet opp til bakken. Nedbørshendelser i slike mettede områder dreneres gjennom avrenning på overflaten.

Bryan (2000) forklarer at overflateavrenning er en diskontinuerlig prosess, som ofte ikke har en dybde på mer enn noen få cm. Vannføring og dens hydraulikk gir variasjon i overflateavrenningen der disse reflekteres gjennom faktorene; jordoverflate, vegetasjon og mikrotopografi som er med og påvirker overflateavrenningen. Områder som genererer overflateavrenning kan oppføre seg svært dynamisk noe som blir stadfestet av artikkelen til Beven & Wood (1983). Figur 3-8 viser hvordan ulike faktorer påvirker både mettet, men også Hortonian overflateavrenning.



Figur 3-8: Forskjellige avrenningsprosesser og dens hydrologiske veier (Tarbaton, 2003).

Under en hendelse med overflateavrenning vil de hydrauliske forholdene variere sterkt ved korte avstander. Når det forekommer hydraulisk glatt overflateavrenning vil motstanden i sedimentkornene ha en dominerende faktor (Singhal et al., 1980; Bryan, 2000). Gjennom urbanisering kan hydraulisk glatt overflateavrenning forklares som noe som øker hastigheten og intensiteten til avrenningen. Glatte flater med lav friksjon vil øke hastigheten på vannet, og derigjennom gi en kortere konsentrasjonstid, redusert infiltrasjon og gi en økende total avrenning som vil inntreffe raskere enn tilfellet før utbygging (Solheim, 2017). Energien som blir overført gjennom nedbør kan i stor være grad med på å påvirke overflatehydraulikken, men denne energien har liten påvirkning på den dyptgående overflateavrenningen (Bryan, 2000). Intense og langvarige nedbørshendelser vil påvirke og øke dybden til overflateavrenningen. Overflaten til grunnen går fra høy ruhet med mange hydraulisk forstyrrende elementer i form av små stein osv. til lav ruhet gjennom erodering og massetransport (Ibid).



Figur 3-9: Forholdet avrenningsrate og fuktighetsinnhold i jorda (Tarbaton, 2003).

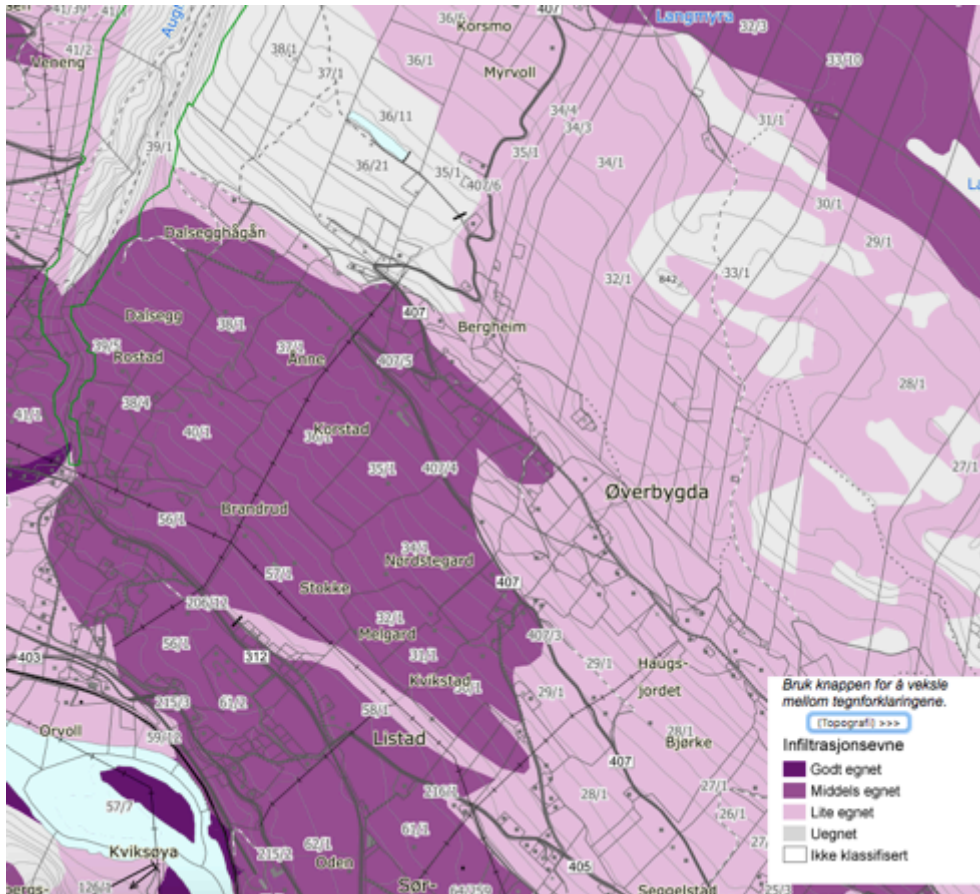
Vann som ikke infiltreres vil avrenne på overflaten, og dette ses der infiltrasjonskapasiteten er nådd, men hvor det samtidig er tilgang på overflatevann og hvor infiltrasjonskapasiteten er nådd. Mest vanlig er dette i områder fri for vegetasjon eller som innehar et tynt lag.

Fuktighetsinnholdet til jorda må overstige en terskel før det oppstår betydelig avrenning (Tarbaton, 2003). De genererte avrenningsprosessene avhenger av jordens fuktighet, mao de antesedente forholdene. Avrenningsmekanismene og prosessene avhenger ikke bare av forholdene gjennom stormer, men også situasjon før stormen. For en komplett forståelse eller representasjon av alle prosesser rundt avrenning og dens mekanismer er det nødvendig å kvantifisere gjennom en hydrologisk modell hvordan avrenningen genereres (Ibid). Vann som infiltreres i bakken gjennom snøsmelting påvirker fuktighetsnivået i jorda og det hydrologiske kretsløpet i innledningen av vårsesongen i kalde områder (Rekolainen, 1989). Ved snøsmelting vil vannet sige inn i den frosne jorda, der vannet gir fra seg latent varme ved frysing som øker temperaturen i det frosne jordlaget (Iwata et al., 2011). Tykke frosne jordlag kan i stor grad vanskeliggjøre infiltrasjon av snøsmeltevann, og vil resultere i økt overflateavrenningen (Sui & Koehler, 2001; Ollesch et al., 2005).

3.6 Vegetasjon

For vegetasjonen i Norge er temperaturen og nedbør to viktige faktorer. Veksts sesongen blir avgjort gjennom døgn som ligger over minimumstemperaturen som avgjør graden av vekst gjennom sesongen. Disse faktorene gjør det mulig å definere de ulike vegetasjonssonene på en lokal, men også på en global skala (Moen, 1998). I Norge er dette spesielt synlig på det Borealske skogbeltet som strekker seg gjennom Skandinavia og inn i Russland. Beltet er

preget av barskog og boreal løvskog. Sonen er klimatisk preget av lange vintre og kort vekstsesong. Gjennom figur 3-10 vises infiltrasjonsevnen for de ulike massene rundt Brandrudsåa (NGU, 2018b).



Figur 3-10: Infiltrasjonsevne for løsmassene i Brandrudsåa (NGU, 2018b).

Vegetasjonen er en viktig faktor for å holde skråninger langs elvebredden og selve elvebredden stabil. Det er egenskapene til vegetasjonen som bestemmer hvor stabil den er. Spesielt skråninger med et dekke av tett, frisk vegetasjon vil holde en høyere effektiv stabiliserende virkning enn en skråning som har delvis eller fraværende vegetasjonsdekket. I skogshogde flater er det viktig å legge merke til at det tar lang tid før røttene forsvinner. Før røttene råtner bort vil de fortsette å ha en erosjonsreducerende effekt, noe som gjelder først og fremst i overhengene og de øverste delene av en skråning. Ghidye & Alberts (1997) kom fram til at erodibiliteten til overflateerosjonen minket med økende mengder døde røtter. Dette gjelder sannsynligvis først og fremst i tilfeller der de døde røttene er i selve skråningen (Duran & Rodriguez, 2007).

3.7 Bratte fjellelver

I Norge består en stor andel av elvenettverket av bratte fjellelver. Som oftest er de avgrenset av bratte skråninger på begge sider, noe som fører til et smalt elveløp. Erosjonen av skråningene fører til elva er utsatt for tilførsel av sedimenter (NVE, 2011). Når det kommer til flomhendelser har bratte fjellelver en høyere flomrate enn andre elver. Dette fører til viktigheten av å ta hensyn til disse i planlegging og forvaltning av disse elvene når de ligger tett på bebyggelse og infrastruktur (NVE, 2013). En direkte konsekvens av sedimenttransporten er kanalgeometrien og morfologien til elva. Church (2006) beskriver morfologien som noe som blir bestemt i hovedsak av størrelsen på og mengden sedimenter som tilføres elveløpet. Noen av løpsmønstrene som dannes i et alluvialt elveløp er; Kaskade, “step-pool” og “pool riffle” (Montgomery & Buffington, 1997).

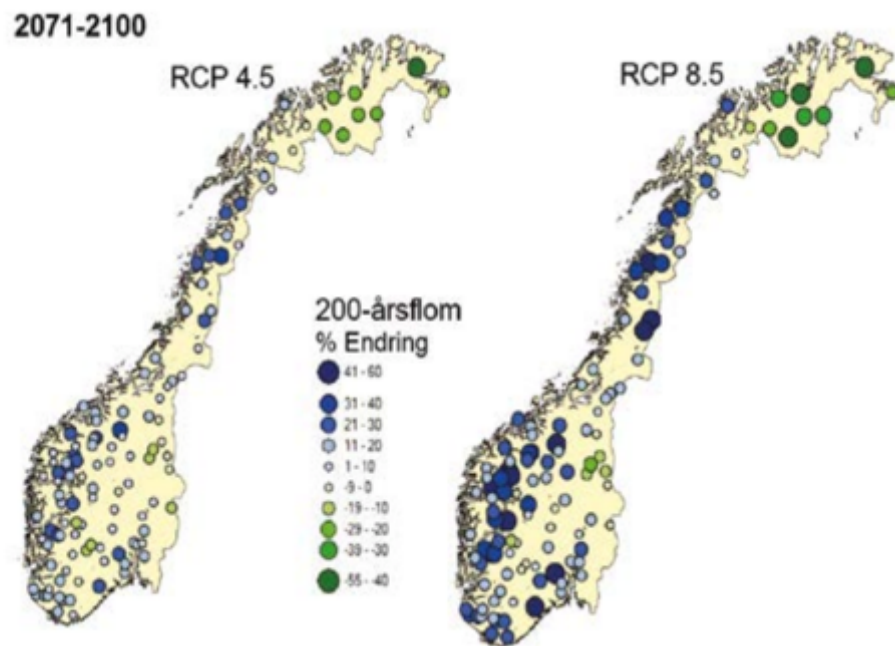
Ved kunnskap om de grunnleggende prosessene kan de romlige sammenhengene i et nedbørsfelt synliggjøres. I tillegg kan det ved en slik kunnskap bli lettere å se koblingene mellom morfologien og prosessene i fjellelver, og dette vil gi et bedre utgangspunkt for å kunne forutsi hvordan fjellelver vil respondere på naturlige og antropogene forstyrrelser (Montgomery & Buffington 1997; Wohl 2006). Prosessbasert kanalklassifisering og landskapsspesifikke romlige forhold kan være med å gi en innsikt i hvordan forstyrrelser kan forplante seg i nedbørsfeltet (Montgomery & Buffington, 1997).

3.8 Flom

Endringer i nedbør og temperatur vil føre til at flommene endrer seg. For å finne ut av dette kan det brukes hydrologiske klimaframskrivninger sammen med flomfrekvensanalyse. I rapporten ”Klima i Norge i 2100” blir det eksemplifisert hvordan en 200-årsflom kan endre seg i framtiden. Det har blitt beregnet mulige endringer i størrelse for 115 uregulerte nedbørsfelt med ulike størrelser og med forskjellige flomforhold. Figur 3-11 viser prosentvis endring i størrelsen for 200-årsflom for framtidsperioden 2071-2100. Verdiene vist er medianen av de samlede resultatene for hvert nedbørsfelt, samtidig viser den store regionale forskjeller i klimaendringers betydning for flomstørrelsen mot slutten av århundret. I perioden 2031-2060 er endringene mindre enn for perioden 2071-2100, det samme gjelder de regionale forskjellene som også er markant mindre (Hansen et al., 2015).

Noen av årsakene til endringer i flomforhold kan være svingninger i sesongnedbør, frekvensen av dager med kraftig nedbør og nedbørsintensitet. Endringer i snømagasin og snøsmelteperioder har en særlig betydning for sannsynligheten av sammenfall av stor

vannføring og kraftig nedbør. Som nevnt tidligere vil snøsmelteflommene i framtiden komme tidligere og i kystnære strøk kan den muligens forsvinne helt. Det regionale mønsteret av økninger og reduksjoner i flomstørrelsen gjenspeiler balansen mellom disse forskjellige prosessene. Den store økningen på Vestlandet og i Nordland henger sammen med det økte antallet av kraftig nedbør (Ibid).



Figur 3-11: Hvordan vil den prosentvise endringen i størrelsen for 200-årsflommer for framtidperioden 2071-2100 være (Hansen et al., 2015).

3.9 Styrtflom

Styrtflom er flomhendelser skapt av nedbørshendelser med svært høy intensitet, men ofte med relativt lokal utbredelse (Barredo, 2007). Det er i norsk sammenheng ingen klar definisjon på styrtflom, men en potensiell definisjon er; *”Styrtflom dreier seg om flom i mindre, ofte bratte nedbørsfelt med liten fordrøyningskapasitet i feltet”* (Waagø, 2012).

Under slike hendelser kan elvekanalenes kapasitet bli for lav for den aktuelle vannføringen, og potensielt i kombinasjon med nedbørintensitet, som overskrider infiltrasjonskapasiteten. Resultatet kan bli overflateavrenning og et stort potensial for erosjon og løpsendringer i kanalene (Vatne, 2013). Overflateerosjon og mulige skred og utglidninger kan tilføre kanalene sedimenter som øker sannsynligheten for løpsendringer. Samtidig som stikkrenner, kulverter og grøfter blir tilført sedimenter kan disse tettes eller redusere kapasiteten for dreneringstiltak knyttet til infrastrukturen.

De scenarier som foreligger for framtidens klima tilsier økt hyppighet av styrtflom.

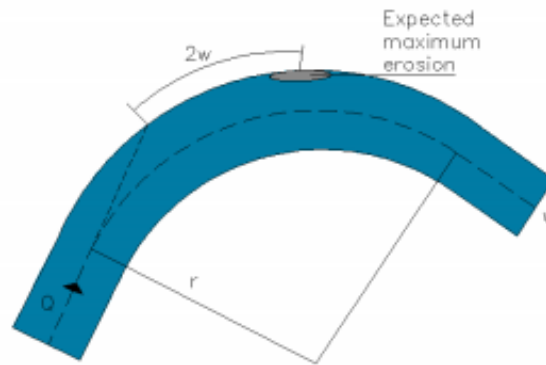
Bakgrunnen for dette er den ikke-lineære sammenhengen mellom temperatur og mengde

vanndamp som lufta kan holde, og som derfor intensiverer den hydrologiske syklusen i et varmere klima (Huntington, 2006). Styrtdelomhendelser har stort skadepotensial, og derfor er det viktig med en bedre forståelse av hvordan interaksjonen mellom nedbørsintensitet og hydrologiske forhold, inkludert effekter av antropogene inngrep, øker eller minsker flomfaren i et gitt vassdrag (Vatne, 2013).

3.10 Fluvial erosjon

Ved flomsituasjoner er erosjon en av de prosessene som skaper størst skade på infrastruktur. erosjonen kan beskrives som en prosess som styres av potensiale for erosjon og hvilken erosjonsevne en jordart innehar (Selby, 2005). Dette potensiale blir blant annet styrt av de kjemiske og fysiske egenskapene til jordarten. I et elveløp vil erosjon være en prosess som foregår både vertikalt og horisontalt i kanalen og erosjonsraten avhenger av egenskapene til materialet som elva drenerer gjennom. Et elveløp er ofte påvirket av to prosesser hvor disse er løpserosjon og massebevegelse i skråningene som går ned i elveløpet (Tesaker et al, 2010). Elvekanalens yttersvinger er i størst grad utsatt for løpserosjon, og her skilles det mellom bunnerosjon og erosjonen som foregår på elvebanken. Store flomhendelser vil påføre elveløpet høy skjærspenning, som kan føre til kraftig erosjon og det kan forekomme omforming i løpsform (Ibid). Høyest rate av erosjon og sedimenttransport vil normalt oppstå under flom. I hvilken grad dette skjer vil være påvirket av sedimentene ved et bestemt sted, strømningsmønster og kreftene tilført i utsatte områder (Jenssen & Tesaker, 2009).

Det er først når vi forstår de ulike erosjonsprosessene om hvor og hvordan sedimentene avsettes at det på en fornuftig måte kan gjennomføres ulike tiltak for å hindre at de samme skadene skjer flere ganger. Om det gjennomføres tiltak oppstrøms som innebærer en faktor som setter elva ut av balanse, vil dette kunne påføre nye konsekvenser nedstrøms i elva. Figur 3-12 illustrerer hvor det kan forventes den største erosjonen i elvesvinger, i tillegg illustrerer den stedet hvor den største erosjonen vil finne sted. Den vertikale strømndistribusjonen er omtrent den samme over hele bredden når vannet strømmer over en flat og bred elvekanal. En smal og irregulær kanalbredde vil påvirke strømndistribusjonen, gitt at den høyeste hastighet er i senter av hovedkanalen. Om det skal opprettholdes en kontinuitet vil vannet strømme på tvers av elveseksjonene, og utvikle et lateralt flommønster. En sideveis strømning kan føre til lokal erosjon eller avsetning på grunn av ujevn distribusjon av skjærspenning (Jenssen & Tesaker, 2009).



Figur 3-12: Hvor i en elvesving vil erosjonen være størst (Fergus et al., 2010b).

Dersom erosjon skal oppstå, må det brukes energi. Energien til elva blir brukt for å måle energioverføringer av vannstrømmen. Elveenergien kan bli brukt som en indikator for erosjonkrefter som virker på kanalbunnen og kanalsidene. Energien til elva blir kalkulert gjennom formel 3-7:

Formel 3-7: Ligning for elveenergi (Fergus et al., 2010b).

$$\Omega = \tau V = (\gamma DS) V$$

Hvor:

Ω = Strømningsenergi (N/ms).

τ = Skjærstress (N/m²).

γ = Den spesifiserte vekten av vann (N/m³).

Partikkelerosjon er den erosjonstypen som er mest utbredt, som er normalt forårsaket av vannstrøm, selv om is og vrakgods også kan føre til erosjon (Jenssen & Tesaker, 2009). Det er flere relasjoner som kan medføre partikkelerosjon; bratte elvebanker, diameteren til steiner som har for lite motstand for å hindre vannstrøm eller erosjon som underkutter elveskråningen. Den største erosjonen og sedimenttransporten vil normalt oppstå under flom. I hvilken grad dette skjer vil være påvirket av sedimentene ved et bestemt sted, strømningsmønster og kreftene tilført i utsatte områder (Jensen & Tesaker, 2009). I små nedbørsfelt kan elveløpet steinlegges, noe som er et effektivt tiltak i særlig bratte bekke- og elveløp hvor det er erosjonsfare (Ibid). Riktig dimensjonering er viktig for å unngå skader på infrastruktur og bygninger. Stikkrenner og kulverter skal dimensjoneres for å kunne takle en flom med gjentaksintervall på 20-50 år (Fergus et al., 2010a). Statens Vegvesen har økt standarden for dimensjonering til 200 års gjentaksintervall (Banenor, 2016).

4 Metode

4.1 Datainnsamling

Datainnsamlingen i denne oppgaven har bestått av innhenting av data gjennom samarbeidet med Kartverket der jeg har mottatt LiDAR-data over feltområde. Det har blitt utført Light Detection and Ranging-skanninger (LiDAR) over område i to perioder mellom 2009-2014, der disse danner grunnlaget for høydemodellen. Data fra sentral felles kartdatabase (SFKB) er benyttet som grunnlag for digitalisering av ulike lag i HEC-RAS. SFKB er en kartdatabase som er etablert gjennom Geovekst-samarbeidet, et samarbeid mellom offentlige og private etater om finansiering og gjennomføring av kartlegging. I denne analysen er det brukt data hentet fra SFKB-katalogene vann og bygg. SFKB er en nyere versjon av felles kartdatabase (FKB), der kartdata fra kommunene blir direkte oppdatert i en sentral database driftet av Kartverket. Dette skal gi alle brukere effektiv tilgang på ferske og kvalitetsikrede data (Kartverket, 2017). Både innhenting av data og prosessering er gjort sammen med Henning Sigstad. Hvordan prosessen fra LAS-filer til ferdig konstruert DEM/TIN er vist i figur 4-4.

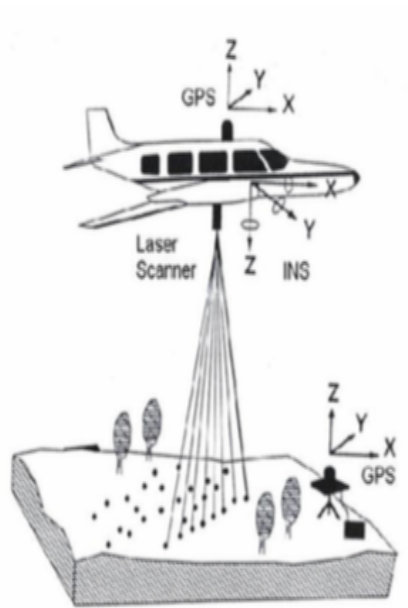
4.2 LiDAR

Light Detection and Ranging eller (LiDAR) er en aktiv sensor som sender et infrarødt signal mot overflaten, og refleksjonen som kommer tilbake blir registrert. Siden lyset beveger seg med en konstant hastighet og gjennom avstanden fra sensoren og ned til overflaten kan tidsforskjellen mellom det signalet som er utsendt og det som er mottatt regnet ut. For å regne ut dette kan det benyttes følgende ligning: Der S er avstanden, v er hastigheten og t er tiden (dobbel gangtid) (Nelson et al., 2009).

Formel 4-1: Ligning for tidsforskjellen mellom utsendt og mottatt signal (Nelson et al., 2009).

$$S = v \cdot t$$

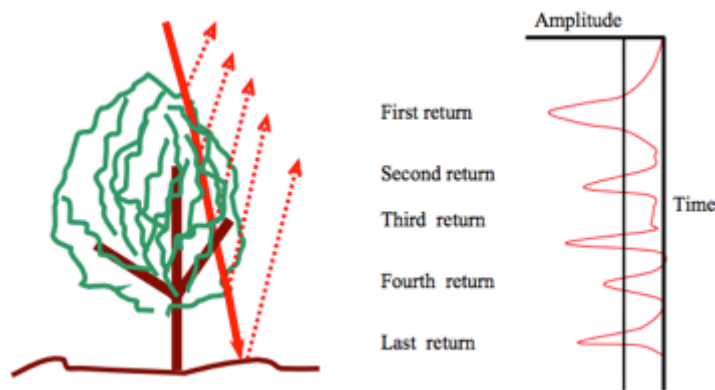
Det som reflekteres tilbake blir registrert gjennom svært følsomme optiske systemer. Sensoren sender ut mellom 10 000 og 50 000 pulser hvert sekund, gjennom dette blir det en svært høy tetthet av mottatte signaler, som er en av hovedfordelene med bruk av denne metoden. Tredimensjonale punkter kommer som et resultat av prosesseringen. I følge Murphy et al., (2008) er den reelle tettheten avhengig av en rekke faktorer som eksempel vegetasjon, der disse punktene må i etterkant separeres fra terrengpunktene.



Figur 4-1: Lidar scanning gjort fra fly (MESH, 2010).

Det skilles mellom terrestrisk LiDAR (bakkeLiDAR/TLS) og luftbåren LiDAR (ALS), og i denne oppgaven er det brukt luftbåren laser skanner (ALS), der denne illustreres i figur 4-1. Systemet består av roterende speil på en eller flere akser, eller en motorisert sensor i skanneren som gir en avbøyning av laserstrålen som registrerer/skanner i horisontal eller vertikal vinkel på overflaten/skråningen. Målingene av rekkevidden gjør det mulig å kalkulere 3D-koordinater (x , y og z) gjennom vinkelkomponentene. Avstanden blir målt gjennom en laserpuls som blir sendt fra skanneren, ved hjelp av strålingsdannende optikk blir laserpulsens kollimert, før den fordeles i speilfacetten og sendes ut. Når laserstrålen treffer et eller flere punkter/mål resulterer dette i ekkopulser, disse blir sendt tilbake til laserskanneren, deretter spredd til mottakeroptikken gjennom speilet, og treffer mottakeren. Hvordan returpunktene varierer vises i figur 4-2. Mottakeren konverterer den optiske informasjonen til elektriske signaler, som blir forsterket, samlet og digitalisert gjennom en analog-digital konvertering. De digitaliserte signalene blir brukt videre i prosesseringen (Riegl Laser Measurement Systems, 2017).

Metoden muliggjør en rask innsamling av detaljert punktdata, noe som gir god beskrivelse av overflaten gjennom 3D koordinater. Er det tilgang på flere georefererte terrengmodeller kan endringene i volum over tid i et skredsår kalkuleres (Wang et al., 2013). De fleste skannere kan registrere flere tusen punkter per sekund, noe som gir en svært høy skanningshastighet. Flere lidarskannere gir målinger av intensiteten til den returnerte strålen, noe som kan endre seg gjennom målt overflatemateriale og optisk bølgelengde (Buckley et al., 2008).



Figur 4-2: Illustrasjon over hvordan utsendt signal forandrer seg fra første til siste retur (Lohani, 2008).

Mindre kraftige laserskannere vil ha en kortere rekkevidde, men ved bruk av denne typen vil strålen være svært stabil innenfor denne rekkevidden. En mindre skanner vil ha en høyere nøyaktighet og bedre tilgjengelig måling av romlig oppløsning på grunn av lavere stråledivergens som godtar at målingene tas tettere langs en skanningslinje (Lichti & Jamtsho, 2006).

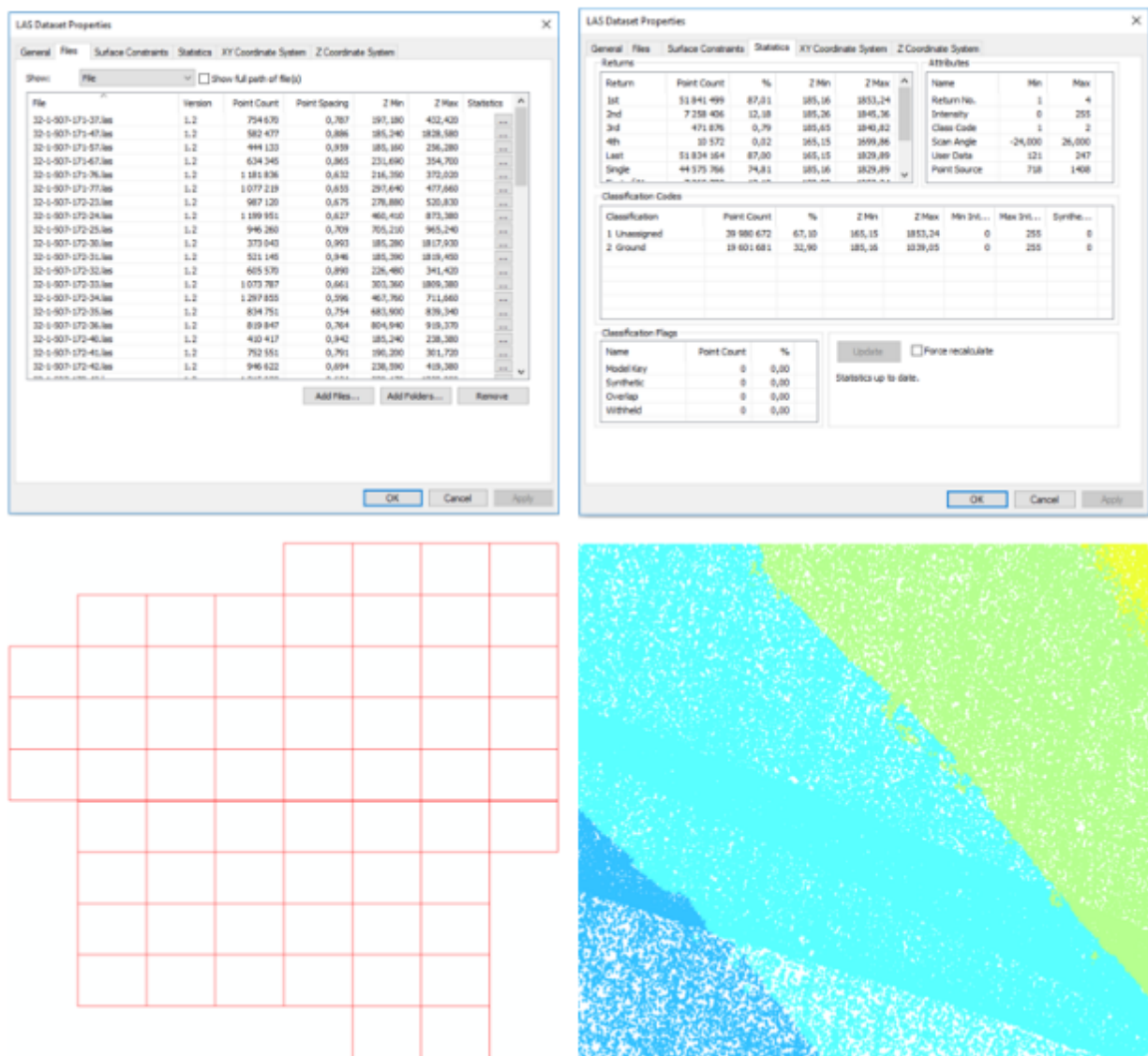
Skanningsposisjonen bør velges slik at hele studieområdet dekkes, og der denne posisjonen er innenfor skannerens maksimale synsvinkel og rekkevidde. Refleksjonsegenskapene til skanneren avhenger av egenskapene til materiale som reflekteres, i tillegg vil også atmosfæreforholdene påvirke resultatet. Høy luftfuktighet kan føre til dispersjon av laserstrålen og føre til en reduksjon i den maksimale rekkevidden til laserstrålen (Buckley et al., 2008). Et LiDAR-system består av tre hovedkomponenter der disse er; laserskanner, GPS (Global positioning system) og IMU (Inertial Measurement Unit). Disse fører til god nøyaktighet og sikkerhet grunnet at flyets posisjon alltid er registrert sammen med laserdataen.

4.3 LAS-datasett

For å lage en terrengmodell basert på LAS-datasett er det flere steg som må gjennomføres. Et LAS-datasett gir oss muligheten til å fremstille en terrengmodell direkte fra LiDAR-data. Punktskyer kan hurtig visualisere store volumer av symboliserte og filtrerte punktskydata. Disse er optimalisert for å vise og dele mange ulike typer sensordata, inkludert LiDAR-data (Esri, 2016a; Rød, 2015). Punktskyer kan direkte konstrueres fra Las-datasett og hjelpe til med å dele 3D-punktinnhold gjennom en plattform. Et punktskylag støttes kun av punktskydata som er i LAS-format, og som er referert av et LAS-datasett. Individuelle LAS-

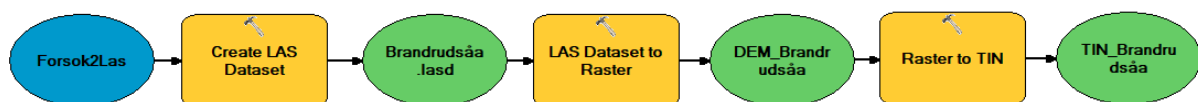
filer kan brukes som input i et punktskylag. Filene leveres ofte i ZLAS/LAZ-format, i disse tilfellene er det nødvendig å konvertere filene til LAS-format, noe som gjøres gjennom et konverteringsprogram (Esri, 2016a; Rød, 2015). LAS-filene er grunnet den store informasjonsmengden delt opp i mindre deler for å gjøre prosesseringen mer hensiktsmessig.

Et punktskylag kan skaleres, noe som gjør det mulig å jobbe med store punktskydatasett raskt og effektivt. Gjengivelse av store sett med punkter går tregt, delvis på grunn av begrensninger i programmet. Et Punktskylag kan være effektivt i området du har lyst til å visualisere, samt som gjengivelse ved en optimalisert punktresolusjon. Informasjon om egenskapene til LAS-filene er illustrert gjennom figur 4-3.



Figur 4-3: Oversikt over prosessering av LAS-data.

Gjennom ”Display Limit” kan begrensninger på hvor mange punkter det skal være i punktskylaget settes. Verdien er i default satt til 1 000 000, verdien er brukerbestemt (Ibid). Totale punkter for LAS-datasettet som er brukt i denne oppgaven er 59 582 353, etter filtrering er det 19 601 681 bakkepunkter. Koordinatsystemet som ble brukt for masteroppgaven er WGS 1984-UTM Sone 32N og NN54. Projeksjonen som er brukt er Transverse Mercator. Figur 4-4 fremstiller hvordan prosesseringen fra LAS-data til det en har ferdig konstruerte DEM/TIN.



Figur 4-4: Prosessen fra LAS-filer til ferdig konstruert DEM/TIN.

4.4 Digital høydemodell (DEM)

Overflaten til en digital høydemodell (DEM) representeres kontinuerlig og beskrives som en diskret representasjon. Når cellen har fått en verdi, forekommer det ingen informasjon om variasjonen innad i cellen, årsaken er at cellen har en konstant verdi. Det er flere aspekter som avgjør nøyaktigheten til dataene; den ene er oppløsningen, den andre er pikselstørrelsen til modellen (Reuter et al., 2009). En annen mekanisme er hvordan oppløsningen på de fysiske dataene er ved konstruering av den digitale høydemodellen. I en DEM vil størrelsen på rastercellene være påvirkende fordi større celler vil føre til en generell representasjon av overflaten. Her er det fordelaktig at LiDAR-dataene har et høyt antall punkter, siden dette danner grunnlag for en lettere konstruering av en modell med høy og god oppløsning. Samlinger av LiDAR-data krever stor lagringskapasitet og resultatet er at en stor andel høydemodeller er LiDAR-genererte gjennom rasterformat (Liu, 2008).

I en hydrologisk analyse er det essensielt at kvaliteten til den digitale høydemodellen er høy. Selv små feil vil kunne påvirke resultat, på grunn av kompleksiteten til algoritmene som styrer analysen. Noen feil som kan påvirke kvaliteten til en DEM er; Punkttettheten til rådataene, rasteroppløsningen, interpolasjonsmetode eller forandringer i terrenget for å nevne noen. I følge Reuter et al., (2009) kan det gjøres endringer på alle elementer, bortsett fra terrengformen i et forsøk på å få en mer nøyaktig konstruert høydemodell. Tate et al., (2002) har forsøkt å finne ut hvordan en terrengmodell som danner de beste premissene for en god hydrologisk analyse kan konstrueres. I programvaren HEC-RAS innhentes høydeverdien gjennom terrengmodellen for hvert enkelt tverrsnitt, dette blir beskrevet i kapittel 5.2.1. Noen ganger finnes det ikke LiDAR-data som kan danne grunnlaget for høy oppløselige

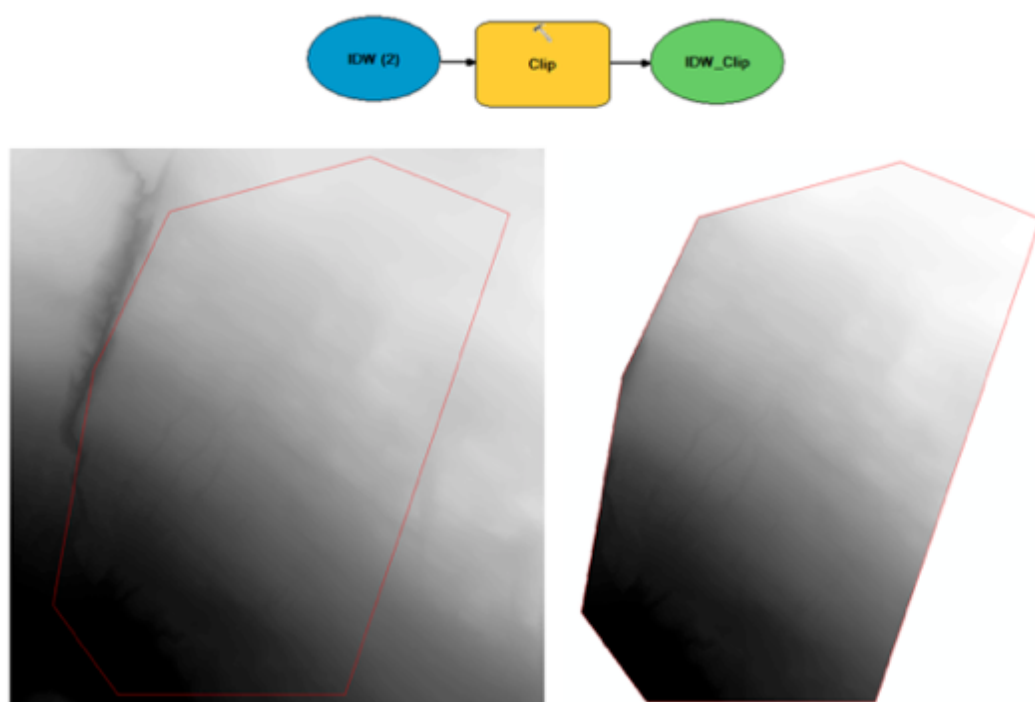
terrengmodeller. I disse tilfellene kan data eksempelvis bli hentet inn gjennom selvstendig skanninger av området (Ibid). Ved forsøk på å gjøre terrengmodellen bedre, kan det innhentes data fra andre vektorlag. I Norge er store deler laserskannet med tilfredsstillende oppløsning, og som er gratis tilgjengelig gjennom Hoydedata.no (Kartverket, 2018).

I fraværet av en høyoppløselig DEM som kilde for tverrsnitt i hydrauliske modelleringer, er nåværende metoder utilstrekkelig. Hydrauliske elvemodeller som HEC-RAS inneholder mangfoldige data om terrenget. Disse er som regel utviklet gjennom ulike undersøkelser, hvor de høyoppløselige dataene ofte lagres i koordinatsystemer i den hydrauliske modellen. Gjennom et format som ikke tar vare på x-y koordinatene fra tverrsnittene. Hovedproblemet med kartlegging av hydraulisk modelldata slik som HEC-RAS har årsak i at GIS og hydrauliske modeller bruker forskjellige koordinatsystemer for lagring av dens data. Numrene til elvestasjonene øker fra nedstrøm til oppstrøms. Hvert tverrsnitt er definert av en rekke sideveis- og høydekoordinater, som typisk er innsamlet gjennom landundersøkelser. Tverrsnitt-koordinatene er målt inn fra enden av venstre tverrsnitt og øker inntil den når sin slutt til høyre når de sees nedstrøms (Tate et al., 2002). En GIS-modell kan implementeres i en diskret romrepresentasjon gjennom kontinuerlige romrepresentasjoner i form av rastergrid, vektorobjekter eller TIN. Ved arbeid med storskala representasjoner av landarealer med et komplekst relieffer er det anbefalt å bruke TIN (Yang et al., 2006).

Ved lav kvalitet eller en naturlig enkel generalisering av DEM, kan det medføre at dreneringslinjer blir avledet gjennom en digital avgrensing fra rutenettdataene om disse avviker vesentlig fra virkeligheten. Hydrologiske vektordata kan bli integrert i en DEM for å gjøre den mer korrekt for analysen. Elver kan bli "nedbrent" og føre til en mer effektiv reproduksjon av kjente og mer generelle aksepterte elvenettverk. "Nedbrenning" fører med seg negative aspekter for endringer i den lokale topografien, siden en prøver å konstruere en sammenheng mellom vektorhydrologien og DEM. Det kreves også en viss innsats for innhenting av hydrologiske vektordata (Gruber & Peckham, 2009).

4.4.1 Clip

For å få et bedre utsnitt av det analyserte området var det nødvendig å benytte verktøyet "Clip". Verktøyet kan klippe ut et mindre område ut av et større eksisterende område. I dette tilfelle er et eksisterende rasterlag brukt som klippepolygon (ArcGIS, 2018). Funksjonen kan klippe ut en del av et rasterdatasett, mosaic-datasett eller et bildelag (TIFF). Prosessen er illustrert av figur 4-5.

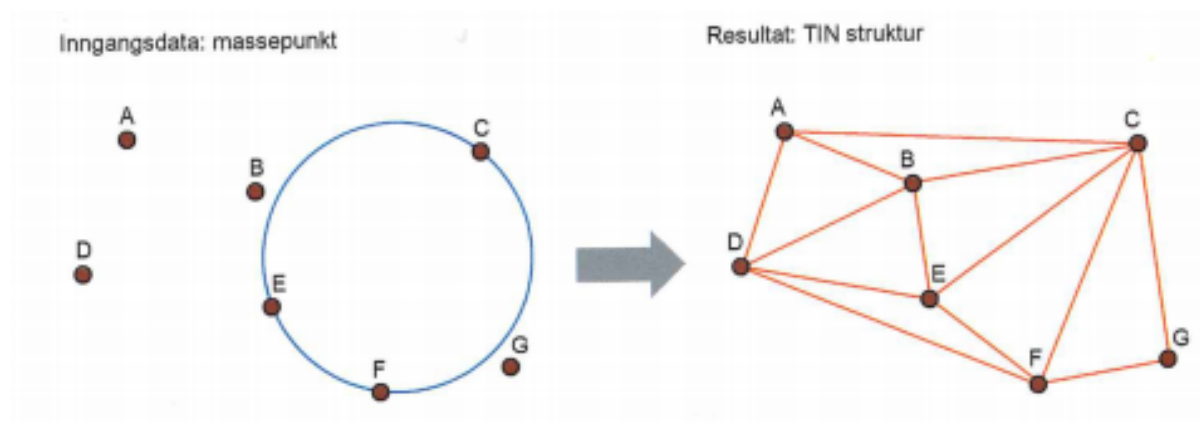


Figur 4-5: Illustrasjon av hvordan verktøyet "Clip" fungerer.

4.4.2 TIN

Overflater representeres ofte gjennom isolinjer, trekantmodeller (TIN) eller raster.

Triangulated Irregular Network (TIN) er en digital terrengmodell som er konstruert av et ikke-overlappende nettverk av trekanter. Disse er konstruert på bakgrunn av et sett med knutepunkter med ujevne mellomrom. Nettverket består av datastrukturer som representerer terrengoverflater på en fleksibel måte der flate områder vil dekkes av færre og større trekanter, mens mer komplekst terreng vil dekkes av flere og mindre trekanter. For konstruksjon av TIN trengs det punkter med høydeverdi, beskrevet som massepunkter, i tillegg danner disse trekant hjørnene i TIN-strukturen (Rød, 2015).



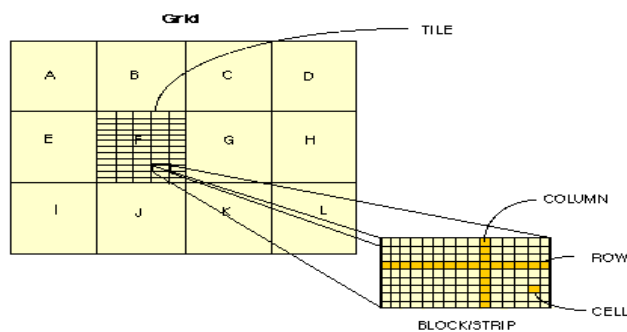
Figur 4-6: TIN-struktur basert på Delaunay-triangulering av høydepunkter (Rød, 2015).

Knutepunktene i en TIN har koordinater i tre dimensjoner, og trekantene dannes ved hjelp av disse, og er beskrevet som overflatefasetter. Helningen og retningen til terrenget er gitt for alle posisjoner innenfor trekantene, mens høyden interpoleres på grunnlag av høydeverdiene til de tre knutepunktene som danner trekantens hjørner (Rød, 2015). Konstruksjonen av trekantene kan gjøres på flere måter, men den mest brukte er Delaunay-triangulering. Denne metoden danner trekanter mellom et sett av punkter, slik at ingen punkter er innenfor trekantens omskrevne sirkel. Figur 4-6 indikerer hvordan et slikt system fungerer. At trekantene dannes med størst mulig regularitet anses som en stor fordel ved Delaunay-triangulering (Ibid).

4.4.3 Grid

Rutenett er et grunnleggende format for rasterdata i ESRI. Det finnes to typer formater for grid; ”integer” som blir brukt for diskrete data, der dataene lagres i en verdi-attributtavhengig tabell. Format nummer to, ”floating point” benytter ikke verdi-attributtavhengig tabell siden cellene kan regne seg fram til verdien gitt for cellen. Celler av denne typen faller ikke inn i kategorien diskret enkelt. ”floating point” blir benyttet for å representere sammenhengende data, og celleverdien er forklart som en funksjon som forklarer dens lokalitet. Et eksempel på dette kan være et rutenett som representerer meter over havet, hvor en celle kan ha en verdi på 10.1662 som indikerer at ved den lokaliteten er høyden på 10 meter over havet (Esri, 2008).

Rutenettets koordinatsystem kan baseres på alle koordinatsystem som representerer geografiske data. Siden hver celle innenfor et rutenett har samme dimensjon som alle andre celler, vil lokaliteten og område dekket av en celle være avgjort av dens rad og kolonne. Koordinatsystemet vil være fastsatt av cellens størrelse, antall rader og kolonner, samt x-y koordinater for øvre venstre hjørne øverst til venstre. Rutenettene er implementert gjennom bruk av ”flis”-strukturer av rasterdata der de grunnleggende enhetene er lagret i rektangulære blokker av celler som vises i figur 4-7. Størrelsen til en ”flis” er basert på antall rader og kolonner i rutenettet under konstruksjonen. Romlige data i et rutenett er automatisk delt på tvers av flere ”fliser” om størrelsen til rutenettet er større ved konstruksjonen enn den øvre grensen for størrelsen til en ”flis” (Esri, 2008).

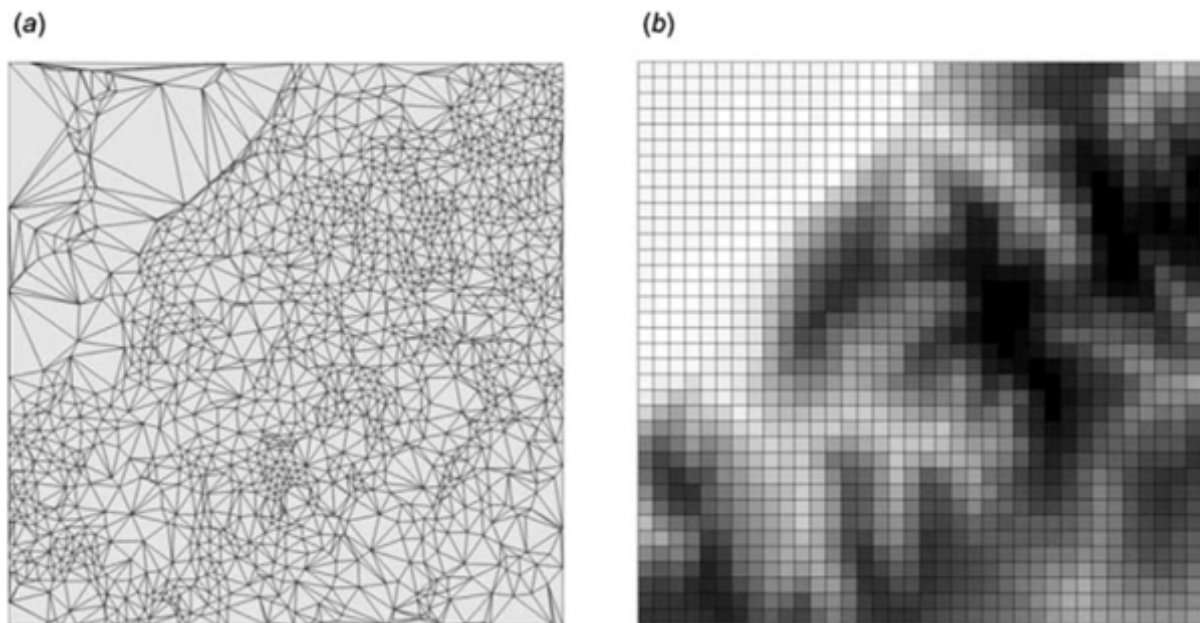


Figur 4-7: Illustrasjon av oppbyggingen av "fliser" i et rutenett (Esri, 2008).

Et viktig kartografisk konsept i analyser av landoverflater er definisjonen av horisontalt rom, herunder projisert system. I standard GIS vil terrengmodeller alltid være i et euklidsk rom, og være presentert gjennom et kartesisk koordinatsystem. Terrengmodeller basert på et rutenett vil bli forstått som at størrelsen til rutenettet vil være likt for hele studieområdet. Grunnen er formlene for uttrekk av landområder er anvendt gjennom euklidsk matematikk. Derfor bør inngangs-DEM være i et slikt system, noe som betyr at terrengmodeller først må bli projisert til samme koordinatsystem. I praksis er uthenting av terrengmodell-parametere gjennomførbart gjennom geografiske koordinater. Mange geomorfologer foreslår at parametere for terrengmodeller og objekter alltid blir hentet ut av grunnleggende ikke-projyserte terrengmodeller, på grunn av reklassifisering av grid til noen projeksjonssystemer kan føre til systematiske forskjeller. Ut ifra figur 4-8, er det tydelig at metoden TIN-DEM representerer terrenget på en mer tilfreds måte enn GRID-DEM konstruert gjennom grid (Hengl & Evans, 2009).

Hengl & Evans (2009) foreslår flere positive aspekter ved bruk av terrengmodeller konstruert av rutenett. Et rutenett har enkel struktur og kan lett bli konstruert på nytt. Det er betydelig enklere å designe objekter på landoverflaten ved bruk av rutenett, årsaken for dette handler om enklere algoritmer. Rutenett har uniform romlig struktur, og i stor grad er alle egenskapene til rutenettet definert gjennom enkle karakteristikk. Derimot, skal det sies at det også er negative aspekter ved bruk av grid terrengmodeller. Et rutenett under-eksemplifiserer topografien i områder hvor topografien er kompleks og vil overdrive en jevn topografi. Reprojysering av rutenett foregår tregt og gir lavere nøyaktighet. Årsaken er at et opprinnelig rutenett mister sin regulære struktur i nye projyseringer og derfor er det nødvendig med rekalkuleringer. Terrengmodeller med rutenett ser ut til å være jevn og sammenhengende, men kan samtidig være en diskret representasjon av topografien. Når vi

definerer størrelsen til rutenettet, vet en ikke noe om den romlige variasjonen mellom cellerutene er jevn eller ikke. Et rutenett trenger heller ikke å være regulær og en sammenligning av DEM og GRID er vist gjennom figur 4-8 (Esri, 2008).



Figur 4-8: Sammenligning av en TIN-DEM og DEM av rutenett (Hengl & Evans, 2009).

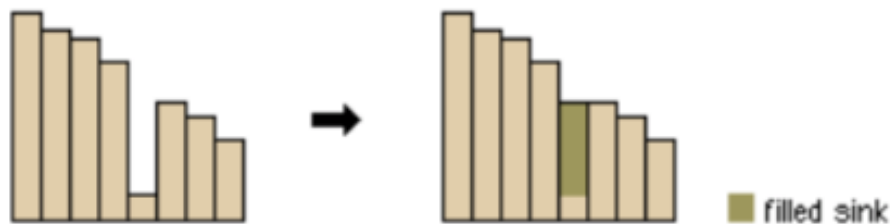
Bilde (a) viser en TIN-DEM med en skala på 1:50 000, og bilde (b) viser en GRID-DEM, med oppløsning på 100 m. Det som vises av denne figuren er at TIN-DEM er i stor grad mer nøyaktig i å representere kurvene, selv om begge inneholder et likt antall romlige funksjoner (Hengl & Evans, 2009).

4.5 Forsenkning (Sink)

En forsenkning er enkelt celle eller samling av naboceller som det ikke er mulig å bestemme dreneringsretning for. Rød (2015) eksemplifiserer dette med; om tre celler i midten har lik høyde, men nabocellene ligger høyere. Dette vil medføre at en ikke får en bestemt dreneringsretning for sentrumscellen, og derfor vil denne bli definert som en forsenkning. En celle med forsenkning blir gitt en verdi lik summen av mulige dreneringsretninger. I dagens høydemodeller kan en anta at disse har mindre feil enn i modeller fra 1990-tallet (Rød, 2015). Naturlige forsenkninger er ikke vanlig å finne i høydedata med en cellestørrelse på 10 meter eller mer (Mark 1988). Selv om det kan en kan finne naturlige forsenkninger i dagens høydemodeller som er kapable til å representere små terrengvariasjoner som et resultat av bedre målemetoder og oppløsning (Rød, 2015).

4.6 Gjentetting av forsenkninger (Fill)

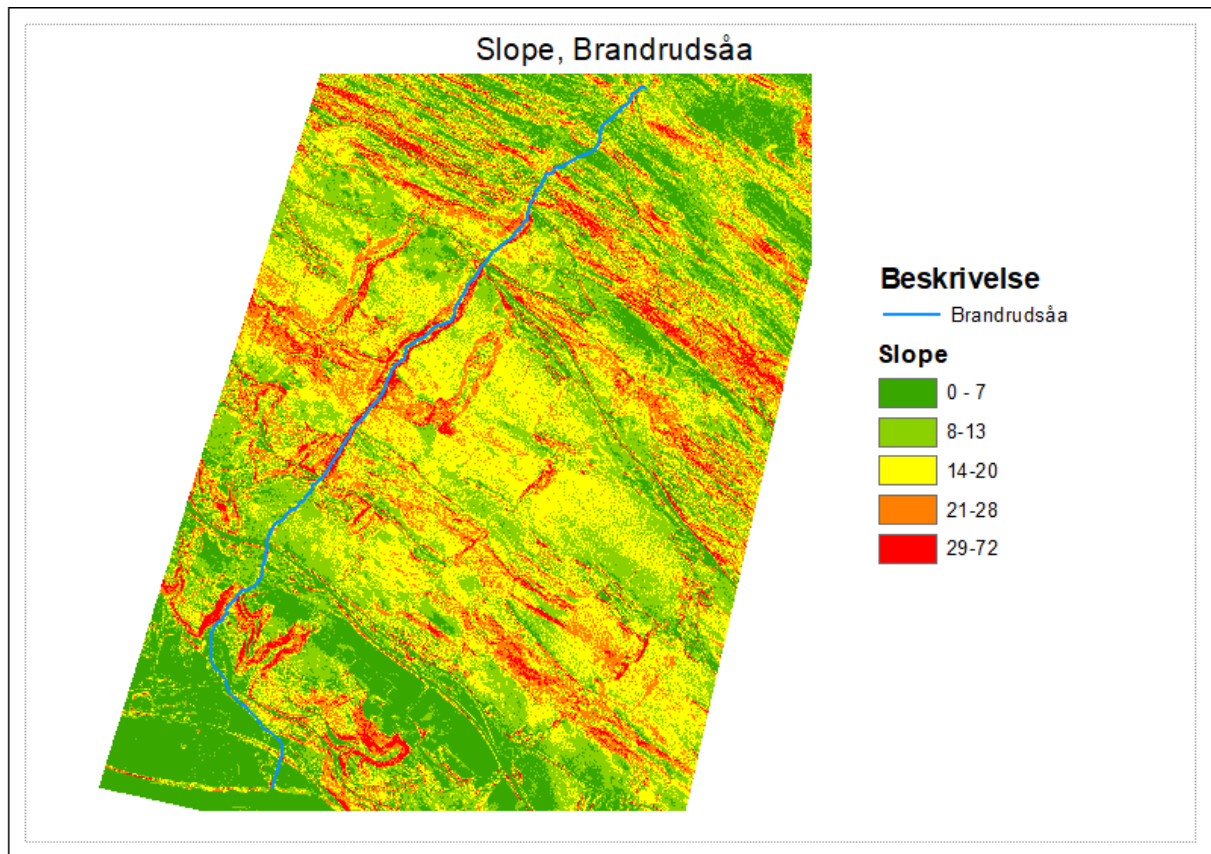
Forsenkninger er ofte feilkilder forårsaket av for dårlig oppløsning, derfor er det nødvendig å fylle igjen disse for å ikke stoppe å hindre avrenningen. Om dette ikke gjøres vil dreneringsnettverket være usammenhengende. Verktøyet "Fill" benytter seg av flere elementer for å fylle igjen forsenkninger, der disse blant annet består av; dreneringsretning, nedbørsfelt og sone fyll (zonal fill) (Esri, 2017). Effekten av "Fill" ser en ut fra figur 4-9.



Figur 4-9: Hvordan fungerer fill (Esri, 2017).

4.7 Helling (slope)

Verktøyet identifiserer hvordan hellingen skrånner, for hver enkelt celle, og fungerer som en indikasjon på hvordan det fysiske terrenget forandrer seg fra topp til bunn. Helling er den maksimale forandringen i z-verdien for hver celle. Bruken av z-verdi er avgjørende for å få nøyaktige kalkuleringer av hellingen når overflaten til z er uttrykt som ulike verdier fra overflatens x-y verdier. Rekkevidden av verdier i resultatet avhenger av type målingsenhet (Esri, 2016b). For grader, er rekkevidden for skrånningen uttrykt gjennom verdi fra 0 til 90 grader. For prosentvis stigning er rekkevidden fra 0 til det uendelige. Men en flat overflate er 0 grader, en 45 graders stigning er 100 prosent. Når en overflate blir mer vertikal, vil prosenten stigning øke (Ibid). Slope er en viktig del av flere modelleringer som gjennomføres i GIS, der hydrologiske analyser er en. Hvordan overflaten skrånner vil påvirke avrenningen på to måter; vannhastigheten vil endres tilsvarende som skrånningen endres, i tillegg vil skrånningen påvirke magasinvolumet på overflaten (NVE, 1997). Figur 4-10 viser hellingen til Brandrudsåa.



Figur 4-10: Helling, Brandrudsåa.

4.8 Flommodellering ved bruk av TIN-baserte høydemodeller

Terrengmodeller konstruert gjennom rutenett dominerer de fleste applikasjoner i miljøvitenskap grunnet dens relativ lette prosessering og det vide spekteret av muligheter. Bruken av TIN har flere tydelige fordeler over terrengmodeller dannet av rutenett for applikasjoner brukt i landskapsutviklingsmodellering, hydrologiske modeller eller derivasjon av strømnings-relaterte variabler. Hovedfordelen ved bruk av TIN, sammenlignet med terrengmodeller er; variasjon i romlig oppløsning og dermed en kraftig reduksjon av antall elementer i de aller fleste tilfeller. Egnetheten for tilpasningsdyktige omdanninger av spredte topografiske felt i henhold til valgkriterier for punkter som optimaliserer de topografiske eller hydrologiske betydningene og størrelsen av datasettene. I tillegg for dynamisk re-diskretisering for landskapsutvikling og horisontale feilplasseringer av landformer (Gruber & Peckham, 2009). Disse fordelene kommer med en pris gjennom økt kompleksitet for datastrukturer og algoritmer som trengs for å håndtere utviklingen av metoder i et TIN-rammeverk.

4.9 Interpolering

Selv om LiDAR-dataene har en god oppløsning og en generell punkttetthet på minst et punkt per meter, gjør det likevel nødvendig med interpolering for å konstruere en optimal terrengrepresentasjon. Interpolasjonsmetoder benytter LiDAR-punktskyen som inngangsdata og gjennom dette blir verdien for hver rastercelle kalkulert. ArcMap tilbyr tilgang på mange ulike interpolasjonsmetoder der hver av disse har en ulik måte for å bestemme verdien til cellen. I følge Childs (2004) bør metoden bli bestemt av distribusjonen av innsamlede punkter og hvilket tema som skal bestemmes. Som interpoleringsmetode i denne oppgaven er det benyttet Invers avstandsvektning, og denne blir forklart i avsnitt 4.9.1. Fisher & Tate (2006) har kommet frem til at det ikke finnes noen fasit for hvilken interpoleringsmetode som lager den beste høydemodellen. Interpolasjonsmetoden vil påvirkes av den naturlige overflaten til terrenget. Nøyaktigheten og fordelingen til punkter som er brukt til å interpolere er med på å bestemme hvilken metode som fungerer best.

4.9.1 Invers avstandsvektning

Invers avstandsvektning eller Inverse Distance Weighting (IDW) blir beskrevet der hvert punkt har innflytelse lokalt, men blir forandret ved avstand (Liu, 2008). Det blir benyttet en lineær vektet kombinasjon der distansen blir påvirket av distansen til det området som blir kalkulert. Punkter som har større nærhet vil ha en større påvirkning enn punktene lenger unna. Metoden interpolerer ut i fra gitte verdier, og derfor kan ikke metoden beregne verdier over eller under maksimumsverdi (Liu et al., 2007). IDW baseres på Tobler's første lov om geografi. Loven bygger på teorien om (Friction of distance) og loven sier at "alt er beslektet med alt annet, men nære ting er mer beslektet enn fjerne ting". Ved å definere romlig autokorrelasjon og hvilken grad et sett av romlige objekter og de tilknyttede verdiene heller mot å være geografisk konsentrert i rom eller spedt. Objekter som er geografisk konsentrert har en positiv romlig autokorrelasjon, hvis objektene er geografiske har de en negativ romlig autokorrelasjon (Legendre, 1993). Det ukjente punktet (x) blir beregnet gjennom de kjente punktene x_i , der i er mellom 1 og n , hvor n er brukerbestemt. Ved beregning av den ukjente høydeverdien til cellen $z(x)$ og de kjente $z(i)$, vil punktene bli gitt en vekt d_i som blir evaluert basert på avstanden fra x til x_i (Longley et al., 2005). Formel 4-2 uttrykker denne kalkuleringen.

Formel 4-2: Ligning for beregning av ukjent punkt (Longley et al., 2005).

$$z(x) = \sum_i W_i Z_i / \sum_i W_i$$

Den interpolerte verdien er et gjennomsnitt av de kjente verdiene, vektet ved W . Det er flere måter å beregne vektingen, men den mest brukte metoden er uttrykt gjennom formel 4-3 (Longley et al., 2005):

Formel 4-3: Ligning for beregning av gjennomsnitt for de kjente verdiene i invers vektet distance (Longley et al., 2005).

$$W_i = 1/d_i^2$$

Vektingen til et bestemt punkt vil reduseres med en faktor på fire om avstanden til et punkt doubles. Om det er brukt en kjent z_i hvor z allerede er kjent, vil den kjente verdien bli returnert, siden vekten av punkt med null i avstand er uendelig, noe som er grunnen til at IDW faller under den deterministiske kategorien for interpoleringsmetoder. En svakhet til IDW er at det vektete gjennomsnittet returnerer alltid en verdi som er innenfor verdiintervallet av de målte verdiene (Longley et al., 2005). Bater & Coops (2009) har funnet ut av hvilke parametere som blir brukt i IDW-interpoleringen kan ha stor betydning for feilkildene i den ferdige høydemodellen. Ved lav punkttetthet vil det i følge Liu et al., (2007) være lite hensiktsmessig å velge en liten cellestørrelse for å oppnå en høyoppløselig terrengmodell og vice versa om inngangs rasteret har høy punkttetthet. Her velges det en terrengmodell med stor cellestørrelse. Valg av oppløsning avhenger av punkttettheten til inngangsdataene og lav cellestørrelse vil føre til en økt detaljeringsgrad i terrengmodellen. I tillegg til hvor nøyaktige de ekstraherte terrengparametere blir (Hengl, 2006; Liu, 2007; Liu, 2008). Valg av cellestørrelse er en viktig del av prosesseringen fra en punktsky til terrengmodell, og hva som er en fornuftig cellestørrelse er det delte meninger om. Esri hevder at en fornuftig cellestørrelse er fire ganger punktavstanden. McCullagh (1988) har utledet en formel som kalkulerer en fornuftig oppløsning for DEM:

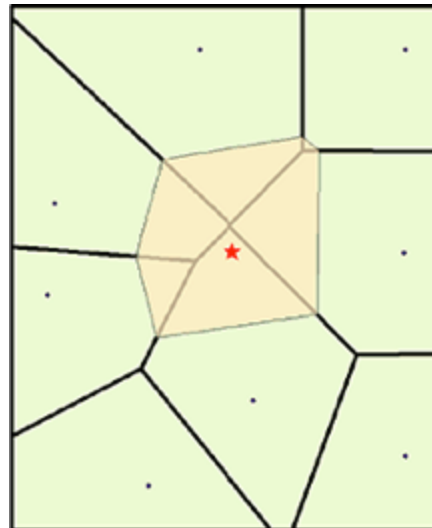
Formel 4-4: Beregning av cellestørrelse (McCullagh, 1988).

$$S = \sqrt{\frac{A}{n}} \quad S = \sqrt{\frac{33\,588\,288}{19\,601\,681}} \approx 1,309\,022\,994$$

Cellestørrelsen (S) blir beregnet av arealet (A) og antall punkter (n). Ut i fra formel 4-4 er det estimert en cellestørrelse på 1,3. I denne oppgaven er cellestørrelse 1 valgt, noe som ikke er langt unna den kalkulerte verdien. Det finnes ikke noen ideell cellestørrelse, men den avhenger av formålet med analysen og terrengformasjonen i den virkelige verden (Hengl, 2006).

4.9.2 Naturlig Nabo

Denne interpolasjonsmetoden kan både benyttes til interpolasjon og ekstrapolasjon, i tillegg har den en god funksjonalitet for samlinger med tilfeldige punkter (Childs, 2004). Metoden er effektiv for store punktskyer og årsaken er at den tar utgangspunkt i nærliggende punkter dannet av Voronoi-polygoner. Det er gjennomsnittet fra cellens naturlige nabo som bestemmer cellens verdi. I følge Childs (2004) er vektingen proporsjonal til området ved estimeringen av stedets Voronoi-polygon som bidro til hver naturlige nabo. Ethvert punkt gjennom naturlig nabo er de som er assosiert med naboens Voronoi-polygoner. Et Voronoi-diagram er konstruert av gitt punkt, representert av olivenfarget polygon. Et nytt Voronoi-polygon, i beige farge, er konstruert rundt det interpolerte punktet, vist med rød stjerne. Proporsjonen av overlappen mellom disse er det nye polygonet og det opprinnelige polygonet er brukt som vekt (ArcGIS, 2016).



Figur 4-11: Naturlig Nabo (ArcGIS, 2016).

4.10 HEC-RAS

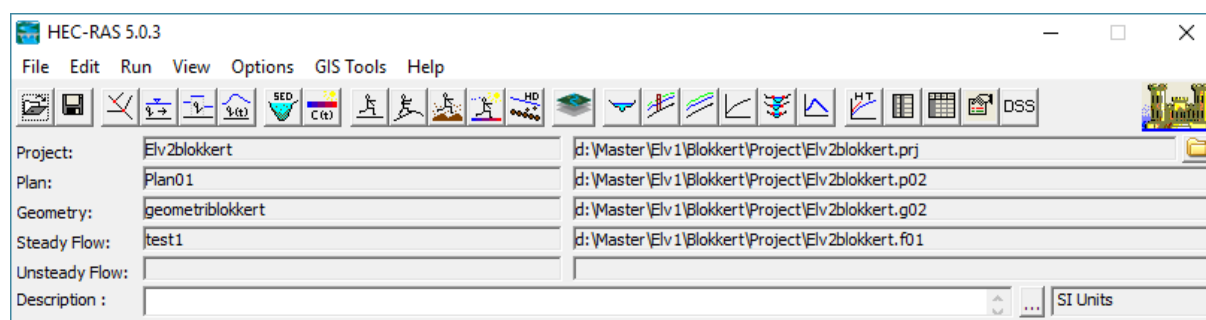
4.10.1 Introduksjon

Prosesen til HEC-RAS består av flere korte og lengre steg som er oppsummert i tabell 4-1. I denne analysen er det brukt ”HEC-RAS – GeoRAS” som er et tilleggsprogram for bruk i ArcGIS. Siden HEC-RAS er et amerikansk program, var det nødvendig å endre fra ”,” til ”.”, for å kunne bruke programmet. I tillegg måtte vi endre ”metric system” fra amerikansk til europeisk. All digitalisering ble gjennomført i ArcMap, hvor dette ble gjort gjennom menyen ”RAS Geometry”. I ArcMap har det blitt digitalisert; elv, tverrsnitt, strømningslinjer, og blokkerte hindringer. Det skal derimot nevnes at det finnes flere parametere som kan digitaliseres, men som det ikke er sett behov for i denne analysen.

Tabell 4-1: Beskrivelse av analyseprosessen fra LAS-datasett til kartlagte flomsoner.

Steg 1: LAS-datasett til raster	Steg 6: Importer DEM	Steg 11: Digitaliser blokkeringer	Steg 16: Modifiser tverrsnitt
Steg 2: Raster til TIN	Steg 7: Digitaliser elvenettverk	Steg 12: Innhenting og redigering av arealbrukskart	Steg 17: Kjør Steady-flow analyse
Steg 3: Fill	Steg 8: Digitaliser Elvebanker	Steg 13: Gi egenskaper til kartlag og eksporter data til HEC-RAS	Steg 18: Generer eksportfilen til ArcMap
Steg 4: Lagring av DTM-er	Steg 9: Digitaliser strømningslinjer	Steg 14: Opprett nytt prosjekt i HEC-RAS	Steg 19: Oppsetting av egenskaper for analysen
Steg 5: Opprett nytt ArcMap-prosjekt	Steg 10: Digitaliser tverrsnitt	Steg 15: Digitalisering og konstruksjon av kulverter	Steg 20: Kartlegging av flomsoner og sammenligning med bilder fra juli 2017

Steg 6 i tabell 4-1 besto av en konvertering fra TIN til Raster, som deretter ble brukt i analysen med GRID. Denne konverteringen ble gjort gjennom verktøyet ”TIN to Raster”. Programmenyen til HEC-RAS består av flere ulike verktøy og funksjoner. I en analyse er det fire elementer som må være oppfylt og disse vises i figur 4-12. Utklippet viser i dette tilfellet at ”Project, Plan, Geometry og Steady flow” er utfylt.



Figur 4-12: HEC-RAS hovedmeny (Brunner, 2016).

4.11 Elvesystem

I HEC-RAS sin modellering av elvenettverk tilbys det en forbedret simulering med bedre datarutiner, som analyseringer av strømmingen ved koblinger, bruer og kulverter. Rutinen støtter både import og eksport av GIS-data, i tillegg til rask og enkel implementasjon av tverrsnitt og hvor brukeren kan visualisere elvebredder og tverrsnittene i et tredimensjonalt

perspektiv (Yang et al., 2006). Ved bruk av ortofoto som et grunnkart, kan konsekvensene av valgte stormer både i elva og omkringliggende strukturer bli visualisert raskt.

Tabell 4-2: Verditabell over elvesystemet.

Shape	Polyline	FromNode	1
OID	1	ToNode	2
Shape_Length	3107,58	ArcLength	3107,58
HydroID	1	FromSta	0
River	Brandrudsåa	ToSta	3107,58
Reach	Main		

Elveskjema er påkrevd for ethvert geometrisk datasett innenfor HEC-RAS. Skjemaet definerer hvordan de forskjellige elvene, lagringsområder og 2D-strømningsområder er sammenkoblet. Det etableres også navn for referanser til andre datasett. Et skjema blir tegnet og koblet sammen av forskjellige hydrauliske elementer innenfor dataeditoren for geometri, og elva/elvene gis en unik ID. Når elvedata blir tegnet vil dataene bli referert til en spesifikk elv i skjemaet. Eksempelvis må hvert tverrsnitt ha benevnelse ”River”, ”Reach” og ”River Station”, der de to første definerer hvilken elv som innehar et bestemt tverrsnitt.

Gjenkjennelse av ”river station” defineres av hvor et bestemt tverrsnitt er lokalisert innenfor en enkelt elv i sammenheng med de andre tverrsnittene i den elva. Sammenkoblinger av elver er sentralt for at modellen skal forstå hvordan beregningene skal foregå fra en bredd til en annen. Hver elv må digitaliseres oppstrøms-nedstrøms, som er den positive retningen for vannstrøm. Elvekoblinger blir brukt for å sammenkoble flere elver inn i et system.

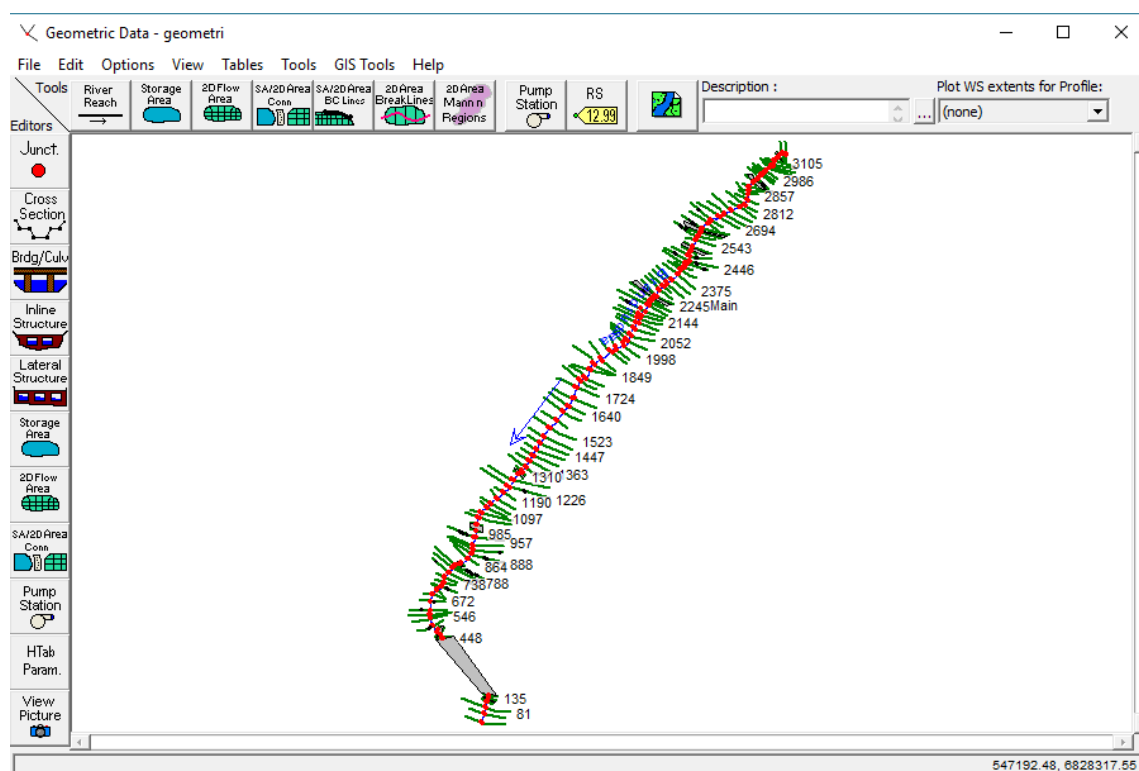
Sammenkoblingene kan kun utføres der to eller flere elver møtes eller splittes opp. Eksempler på dette kommer fram i figur 4-13 (Brunner, 2016).



Figur 4-13: Eksempel på et elveskjema, med forgreina elver, og et utsnitt av elveskjemaet i denne oppgaven (Brunner, 2016).

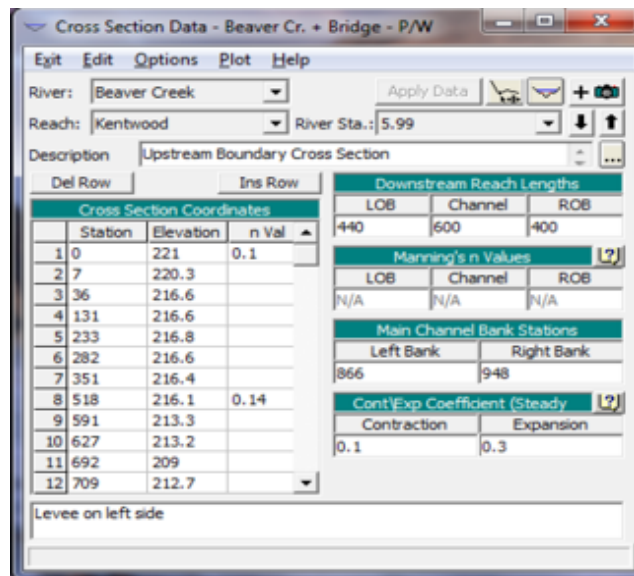
4.12 Tverrsnitt

Tverrsnittene blir brukt for å identifisere områder hvor tverrsnitt-data er utvunnet fra den digitale terrenngmodellen. Tverrsnittenes kryssninger er sammen med de andre RAS-lagene med på å bestemme lokalitetene til «Bank Stations» og elvebredder nedstrøms av tverrsnitt. Det er flere retningslinjer for hvordan det skal konstrueres tverrsnitt, blant annet skal linjene tegnes fra høyre mot venstre når det sees nedstrøms.



Figur 4-14: Avstand mellom tverrsnitt.

Linjetettheten for tverrsnittene bestemmes av brukeren (Mie et al., 2012). I denne oppgaven ble det brukt en tilsvarende tetthet som vises i figur 4-14 I tillegg er det viktig at linjene dekker hele flomområde som skal modelleres. Tverrsnittene kan ikke krysse hverandre og kan bare krysse en elv en gang.



Figur 4-15: Egenskapstabell for tverrsnitt.

Ut i fra figur 4-15 ser en at hvert tverrsnitt blir gitt egenskaper som: Mannings n , elvestasjoner og høyde for elvestasjonene. Distansen mellom tverrsnittene er plottet inn som nedstrøm rekkevidde i editoren til tverrsnitt-data. Mannings n value er 0,1 og 0,14.

Grensegeometri for analyse av vannstrøm i naturlige elver er spesifisert med bakgrunn av terrengprofiler og distansen mellom dem. Tverrsnittene er lokalisert gjennom et brukerbestemt intervall mellom dem på tvers av elveleie for å karakterisere strømkapasiteten og den tilhørende flomsonen. Linjene bør gå over hele flomsonen og bør være vinkelrett på de antatte strømningslinjene. Av og til er det nødvendig å tegne tverrsnittene som en kurve eller som 45 graders vinkel over elva for å oppnå kravene. Ethvert forsøk bør ha fokus på å konstruere tverrsnittene så korrekte som mulig for å få en nøyaktig representasjon av elva og geometrien til flomsonene.

Den generelle tilnærmingen for konstruksjon av linjene er å påse at tverrsnittene er vinkelrette på flomlinjene. Dette krever en estimering av hva flomlinjene vil se ut som ved elvebankene rundt elvekanalen. Her er det flere muligheter, der den ene er; tegne en senterlinje for elva nedstrøms hovedkanalen der det tenkes at linjen kommer midt på den største strømmen i elva.

Dette kan bli gjort for venstre og høyre elvebank. Antatt strømningsmønster for elva og elvebankene er vist i figur 4-16.



Figur 4-16: Eksempel på tverrsnitt (Brunner, 2016).

Programmet krever at det er tverrsnitt som representerer punkter langs hele elva og ved punkter der det er forandringer i utløp, skråning, form eller ruhet, i tillegg til der leveer starter/slutter, og hvor bruer eller andre strukturer kan spille inn på elvestrømmen. Avstanden mellom linjene er også en funksjon av elvestørrelsen, skråning og utførelsen av formen til tverrsnittene. Normalt kreves det færre tverrsnitt der elva har flate områder og flere der elva er bratt. Bakgrunnen for studie har innvirkning på avstanden og antall tverrsnitt. I tillegg spiller valg av ligning for friksjonstap inn på avstanden mellom tverrsnittene. Hvert tverrsnitt i HEC-RAS blir identifisert med egenskaper som elv, bredd og elvestasjon. I tillegg blir tverrsnittene forklart ved å taste inn høyde (x-y) fra venstre mot høyre, når elva sees nedstrøms.

Identifisering av elvestasjoner kan samsvare med stasjoner langs kanalen eller andre fiktive systemer for numre (Brunner, 2016).

Nummersystemet må være konsekvent, i og med at programmet antar et høyere nummer oppstrøms og et lavere nummer nedstrøms. Hvert datapunkt i et tverrsnitt blir gitt et nummer som samsvarer med nummeret til venstre. Opp til 500 datapunkter kan bli brukt for å beskrive hvert tverrsnitt. Programmet antar at venstre side av elva har det laveste nummer for stasjon og at det er høyre side som har det høyeste. Uansett, mer enn et punkt kan ha den samme stasjonsverdien, og en stasjon kan ha negative verdier. Venstre og høyre stasjon som skiller hovedkanalen fra elvebredden må bli spesifisert i data-editor. Endepunkter for tverrsnitt med verdi lavere enn den beregnede vannoverflaten vil automatisk bli forlenget vertikalt og det vil komme en indikering om forlengelse av tverrsnitt (Brunner, 2016).

Distansen mellom to tverrsnitt vil bli referert som elvebredde. Denne bredden, i tillegg til venstre og høyre elvekant, samt elvekanalen vil bli spesifisert i data-editoren til et tverrsnitt. Bredden til en kanal er typisk målt langs ”thalweg”. Disse tre verdiene vil ofte være like, men det finnes forhold der de har stor variasjon, slik som ved elvesvinger, eller hvor elva meandrerer og ved rette elvebanker. Om distansen mellom tverrsnittene for kanal og elvebredd er forskjellig, vil en utløps-vektet elvebredd bli bestemt basert på utløpet for hovedkanalen, og venstre-høyre elvebank (Brunner, 2016). Kontraksjon- og ekspansjonstap blir i HEC-RAS beregnet gjennom formel 4-5:

Formel 4-5: Ligning for beregning av kontraksjon og ekspansjon (Brunner, 2016).

$$h_{ce} = C \frac{a_1 v_1^2}{2g} - \frac{a_2 v_2^2}{2g}$$

Hvor C er koeffisienten for kontraksjon eller ekspansjon. Programmet antar at kontraksjon oppstår (a) når hastigheten nedstrøms er høyere enn hastigheten oppstrøm. Når hastigheten er høyere oppstrøm enn hastigheten nedstrøm antar programmet en ekspansjon i strøm. Kontraksjon og ekspansjon av strøm forårsaket av forandringer i tverrsnittene er en vanlig grunn for tap av energi innen en elvebredd. Når dette oppstår, vil tapet bli beregnet fra kontraksjon/ekspansjon-koeffisienten spesifisert på tverrsnitt-dataeditoren. Koeffisienten som er anvendt mellom tverrsnitt, er spesifisert som en del av dataene for oppstrøms tverrsnitt. Denne koeffisienten blir multiplisert av den absolutte differansen i hastighet mellom den aktuelle og neste tverrsnitt nedstrøm, som gir tapt energi gjennom overgangen (Brunner, 2016).

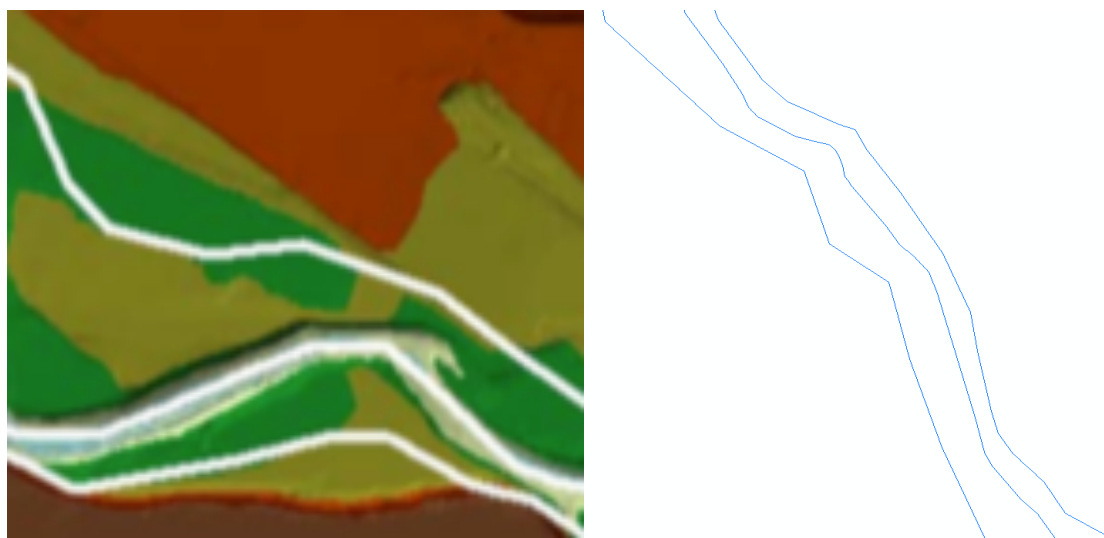
4.13 Strømningslinjer

Strømningslinjer er et valgfritt lag som kan digitaliseres ved ønske. Det er ved digitalisering nødvendig med to linjer; høyre-venstre av hovedkanal. Disse egenskapene blir lagt til i HEC-RAS brukermeny (Ackerman, 2012), noe som gjøres for å kalkulere lengden mellom tverrsnitt og elvelengden. Vannstrømningen blir funnet ved å beregne strømmen i midten av elva for høyre- og venstre elvebank og i hovedkanal. Tegn linjene fra oppstrøms til nedstrøms og hver elv må ha et sett av høyre, kanal og venstre strømningslinje. Det har vært uklarheter rundt hvordan disse skal tegnes, årsaken til dette er at det er ulike forklaringer for digitalisering i Ackerman (2012).

Tabell 4-3: Verditabell for strømningslinjer.

Shape	OID	Shape_Length	LineType
Polyline	1	3107,523258	Channel
Polyline	8	3158,325106	Left
Polyline	9	3104,76396	Right

Figur 4-17 viser det hvordan strømningslinjene er digitalisert i Ackerman (2012), og det ser ikke ut som det er en fasit på hvordan disse skal digitaliseres. Digitaliseringen i denne oppgaven er basert ut i fra synlige flomsletter. Tabell 4-3 viser elementene som strømningslinjene må bestå av. Herunder "Shape_Length" og "LineType" som inneholder; Channel, Left og Right.



Figur 4-17: Illustrasjon "strømningslinjer" fra Ackerman (2012) og egen digitalisering.

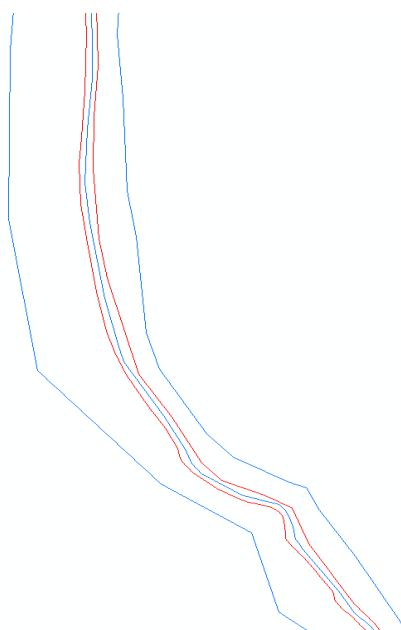
4.14 Banklinjer

Banklinjer definerer hovedkanalen fra områder med flomsedimenter/sletter, samtidig blir disse bli koblet opp mot tverrsnittene på grunnlag av krysningene av banklinjer og tverrsnitt. I følge Ackerman (2012) er det mer effektivt å digitalisere dette laget i HEC-RAS, gjennom "Graphical Cross Section Editor tools". Opptil to banklinjer kan krysse hvert tverrsnitt, og de kan også være fragmentert. Hvordan banklinjene er orientert spiller ikke stor rolle, dermed trenger de ikke å digitaliseres fra oppstrøms til nedstrøms. Generelt bør hver elv ha venstre og høyre elvelinje. Tabell 4-4 viser hvilke verdier som er gitt til de ulike egenskapene i banklinjer.

Tabell 4-4: Verditabell for banklinjer.

Shape	OID	Shape_Length	HydroID
Polyline	1	137,523569	325
Polyline	2	140,095819	326
Polyline	3	714,622878	327
Polyline	4	725,557588	328

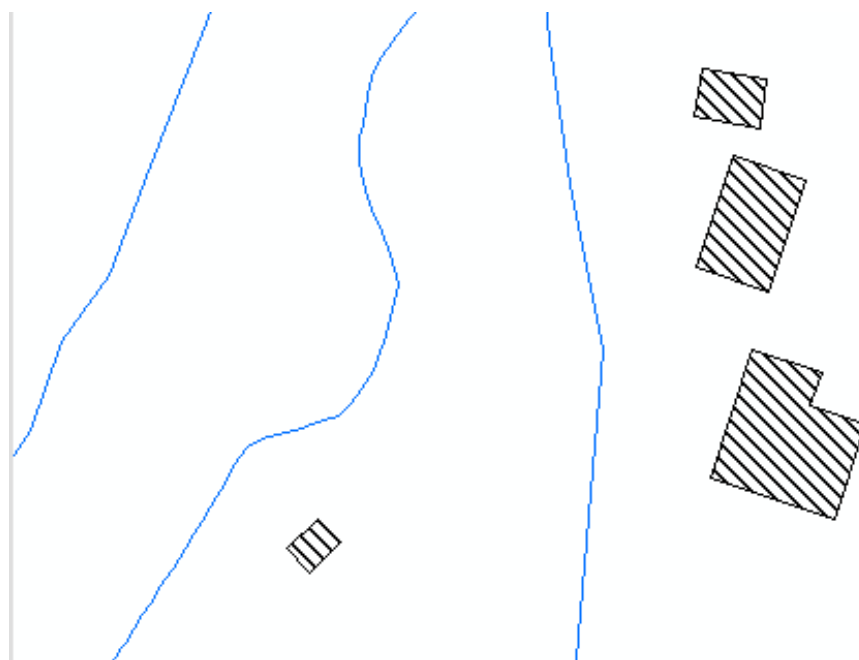
Banklinjene ble digitalisert i ArcMap, men koblingen opp mot tverrsnittene ble gjort gjennom HEC-RAS slik Ackerman (2012) anbefaler. På grunn av at det ikke er noen retningslinjer for hvordan banklinjene skal bli digitalisert ble det tatt utgangspunkt i hvor kantene til elvekanalen går og dette ble visualisert gjennom terrenngmodellen. En visualisering av elvelinjer og strømningslinjer vises i figur 4-18.



Figur 4-18: Digitalisering av strømningslinjer (rød) og elvelinjer (blå).

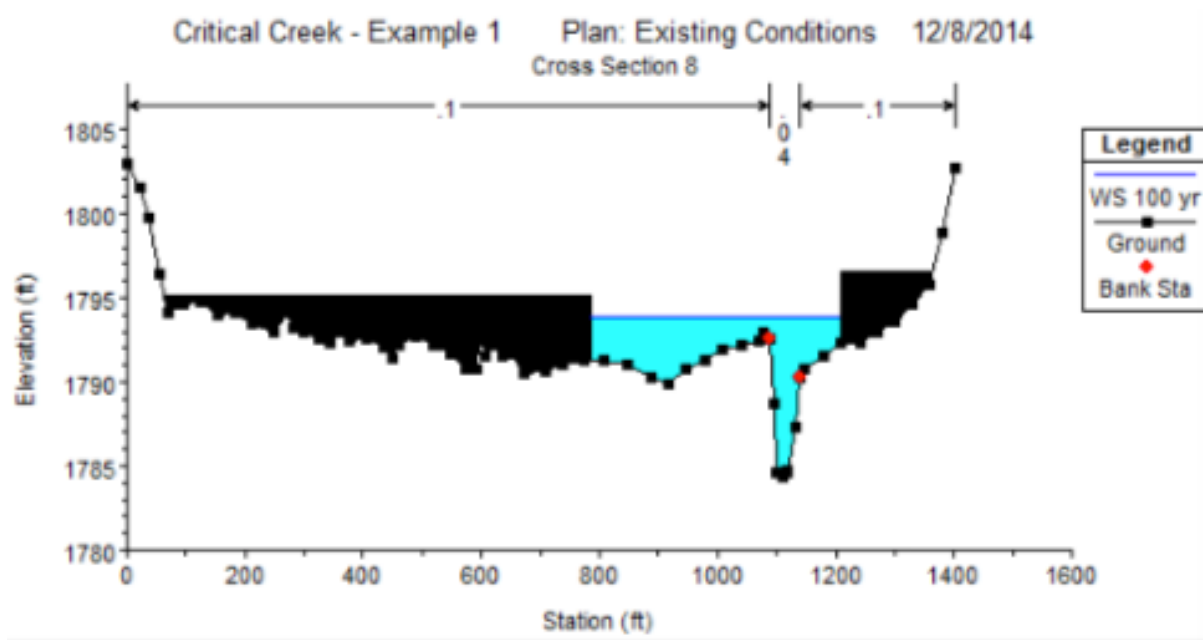
4.15 Blokkerte hindringer

Et av underverktøyene i HEC-RAS er at brukeren har muligheter til å definere områder i et tverrsnitt som er blokkert for vanlig strøm. Hindringer sørger for å redusere flomarealet og tilføre et vått perimeter når vannet kommer i kontakt med blokkeringen. En hindring forhindrer ikke vannet i å renne på utsiden av blokkeringen. I etterkant av digitaliseringen må posisjonsverdier blir ekstrahert fra hver hindring, dette gjøres gjennom menyen "RAS Geometry – Blocked Obstructions – Positions". Hvordan vi har digitalisert de blokkerte hindringene er visualiseres av figur 4-19.



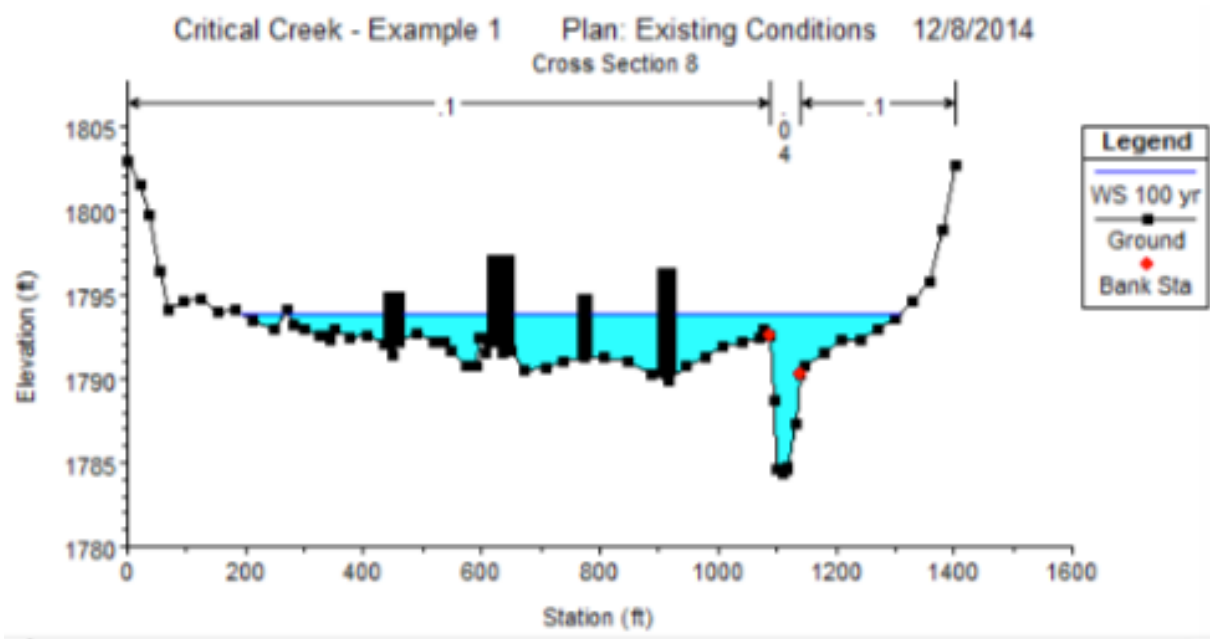
Figur 4-19: Illustrasjon av elveløp og blokkerte hindringer.

Det finnes to muligheter for digitalisering av blokkeringer, hvor den første gir brukeren muligheten til å definere en venstre- og høyre stasjon, og venstre-høyre høyde. Ved bruk av denne metoden vil område til venstre av venstre stasjon og høyre for høyre stasjon bli fullstendig blokkert ut, hvor dette vises i figur 4-20 (Brunner, 2016).



Figur 4-20: Fullstendig blokkering av vannvei (Brunner, 2016).

I metode to kan brukeren konstruere opptil 20 individuelle blokkeringer, der det tastes inn venstre og høyre stasjon, samt høyden til disse, som vises av 4-21 (Brunner, 2016).



Figur 4-21: Flere individuelle blokkeringer (Brunner, 2016).

4.16 Arealbruk

I denne analysen er det benyttet arealbruk som en parameter for å gjøre analysen mer eksakt. Årsaken til dette er at hver enkel arealtype har ulike egenskaper for hvordan vannet vil bevege seg på overflater. Ved å ta disse inn i analysen vil HEC-RAS kalkulere hvordan vannets overflateavrenning er. Dataene som er brukt for dette er hentet ut gjennom NIBIO. I dette tilfelle er det brukt kategoriene beskrevet i tabell 4-5. Hver enkelt arealkategori har blitt gitt en Mannings n -verdi (Brunner, 2016).

Tabell 4-5: Arealbruk, beskrivelse og Mannings n -verdi.

Arealbruk	Beskrivelse (Chow)	Mannings n
Samferdsel og Bebyggelse	Rough Asphalt	0,016
Jordbruk	Mature fields Crops	0,040
Skog	Heavy stand of timber, few down trees, little undergrowth, flow below branches	0,100
Snaumark	Cleared land with three stumps, no sprouts	0,040
Myr	Very weedy reaches, deep pools, or floodways with heavy stand of timber and underbrush	0,100
Ferskvann	Clean, winding, some pools and shoals	0,040

Etter dette blir det lagd en ny tabell (tabell 4-6) som ekstraherer n -verdier fra hvert tverrsnitt. Gjennom verktøyet extract n -values blir en ny tabell opprettet kalt "Manning" som inneholder denne informasjonen. Fraksjonen er distansen langs tverrsnittet til starten av arealbrukskategorien.

Tabell 4-6: Tabell over LUManning.

LUManning			
ObjectID	LUCode	N Value	Landuse
1	<Null>	0,016	BebyggelseSamferdsel
2	<Null>	0,04	Jordbruk
3	<Null>	0,1	Skog
4	<Null>	0,04	Snaumark
5	<Null>	0,1	Myr
6	<Null>	0,04	Ferskvann

Fraksjonen (tabell 4-7) viser plasseringen av startpunktet for n -verdien langs tverrsnittet for de ulike n -verdiene underveis. XS2DID beskriver heltallet som korresponderer med tverrsnittets HydroID (Ackerman, 2012).

Tabell 4-7: Manning.

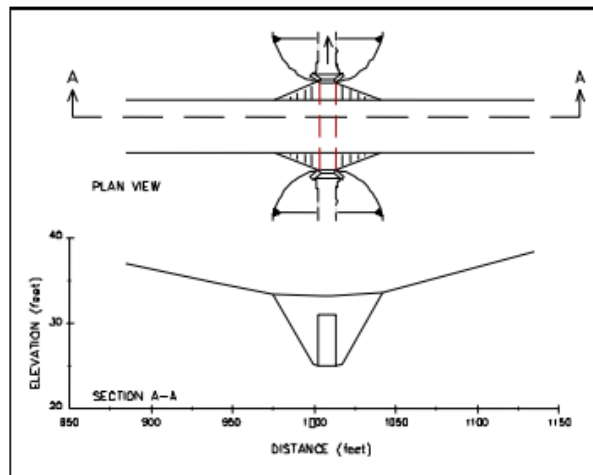
Manning			
OBJECTID	XS2DID	Fraction	N Value
157	344	0	0,1
158	345	0	0,1
159	346	0	0,1
160	346	0,56205	0,04
161	346	0,87972	0,1
162	347	0	0,1

4.17 Kulverter

Programmet kalkulerer tapt energi forårsaket av strukturer som kulverter, gjennom tre deler. Det første er tapet av strømningsenergi som oppstår i elva umiddelbart etter en dempning, hvor kapasiteten vil øke betraktelig. Del to tar for seg tapet i vannstrøm, som oppstår når vannet strømmer gjennom kulverten. Tredje delen handler om tapet som skjer i elva, umiddelbart oppstrøms av strukturen, der vannstrømmen blir sammentrukket ved innløpet til kulverten. Kulverter kan modelleres som enkle, flere identiske og flere ulike kulverter (Brunner, 2016).

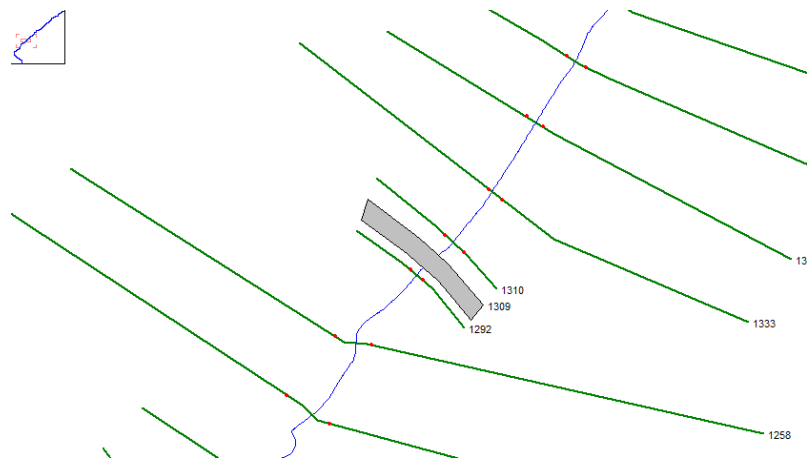
4.17.1 Modellering av kulverter

Rutinene for modellering av kulverter i HEC-RAS er de samme som for konstruksjon av bruer. Utløpskontroll er beregnet ved balansering av energiligningen fra nedstrøm til oppstrøms av kulverten. Konstruksjon av bruer og kulverter har mange likhetstrekk noe som visualiseres i figur 4-22 (Brunner, 2016).



Figur 4-22: Sammenligning konstruksjon av bruer og kulverter (Brunner, 2016).

Det kan gjennom programmet modelleres ni ulike kulvertformer. For denne oppgaven er det brukt to typer; sirkulære og kvadratiske kulverter. Hver kulvert må inneholde fire tverrsnitt, som inkluderer et tverrsnitt umiddelbart nedstrøms kulvert, det samme gjelder oppstrøms kulvert. Tverrsnittene ved de to endene representerer kanalen på utsiden av kulvertene. Separate kulvertdata vil bli brukt for å lage tverrsnittene på innsiden av kulvertene.

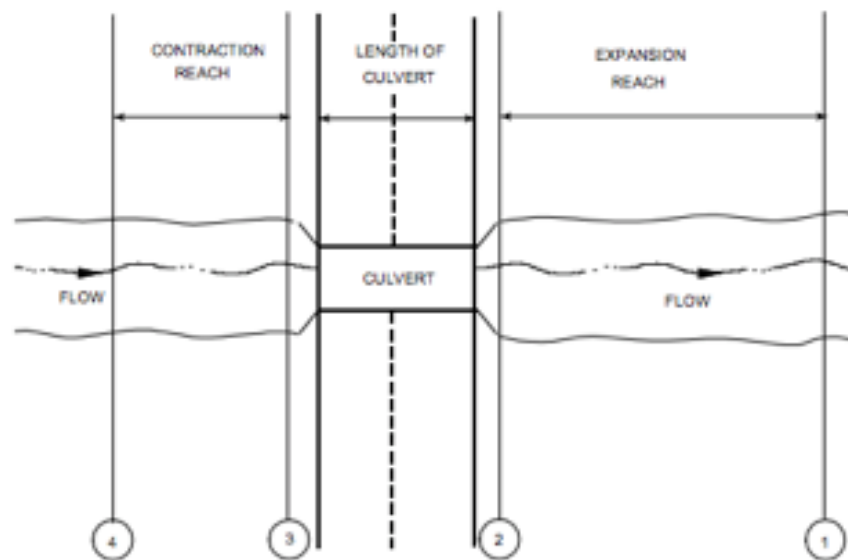


Figur 4-23: Illustrasjon over tverrsnittene oppstrøms og nedstrøms av kulvert.

I kulvertmodellen bør tverrsnitt nummer en være lokalisert der vannet har oppnådd maksimal vannstrøm forårsaket av kontraksjonen som skjer oppstrøms. Tverrsnitt nummer to bør konstrueres likenedstrøms av utgang kulvert, og distansen bør representere den korte distansen som er nødvendig for den brå overgangen av strømmingen fra kulverten til kanalen. I tillegg bør den representere formen til kanalen nedstrøms av kulvert. Hvor bredt område for aktive strømminger vil avhenge av distansen fra utgang kulvert, til tverrsnitt to. Tverrsnitt nummer tre bør tegnes like overfor oppstrøms kulvert og vil representere den fysiske konfigurasjonen til kanalen oppstrøms. Tverrsnittet er anbefalt tegnet i en passe lengde fra

inngang kulvert, slik at den brå overgangen for strømningene har plass til å foregå. Rutinene for kulverter tar høyde for at inngangstapet blir tatt med i kalkuleringene. Modellen krever et område der tappt inngangsenergi kan forekomme. Tverrsnitt nummer fire i kulvert-modellen bør lokaliseres der vannstrømmen ennå ikke har begynt kontraksjonen fra dens tøyling oppstrøms kulvert til innsnevringen ved oppstrøms kulvert. Distansen vil normalt avklares gjennom antagelser om en-til-en innsnevring av vannstrøm. Derfor vil gjennomsnittsraten ved en vannstrøms kontraksjon passere gjennom åpningen til kulverten, antas til å være en fot vertikalt for hver fot transportert i nedstrøms retning. Tverrsnitt 1, 2, 3 og 4 illustreres gjennom figur 4-24.

Brukerdefinerte koeffisienter er påkrevd for å beregne tapet ved inngangen gjennom kontraksjonen og ekspansjon av strøm ned- og oppstrøms. Tapene er beregnet av multiplikasjon for ekspansjon og dividering av koeffisienten for kontraksjon gjennom den absolutte forskjellen i vannhastighet mellom de to tverrsnittene (Brunner, 2016). Dette illustreres i figur 4-24 mens figur 4-23 illustrerer digitaliseringen av kulverter med tverrsnitt i denne oppgaven.



Figur 4-24: Layout for tverrsnitt for kulvertmetoden (Brunner, 2016).

4.18 Steady flow

Denne komponenten brukes for modelleringer av systemer med stabil eller gradvis variert strøm. Systemet kan analysere elvenettverk av kanaler eller individuelle elver. Programmet kan modellere strømregimer som; subkritisk, superkritisk eller blandede strømregimer. Kalkylene og prosedyrene er basert på løsninger gjennom ligningen som beskriver en-

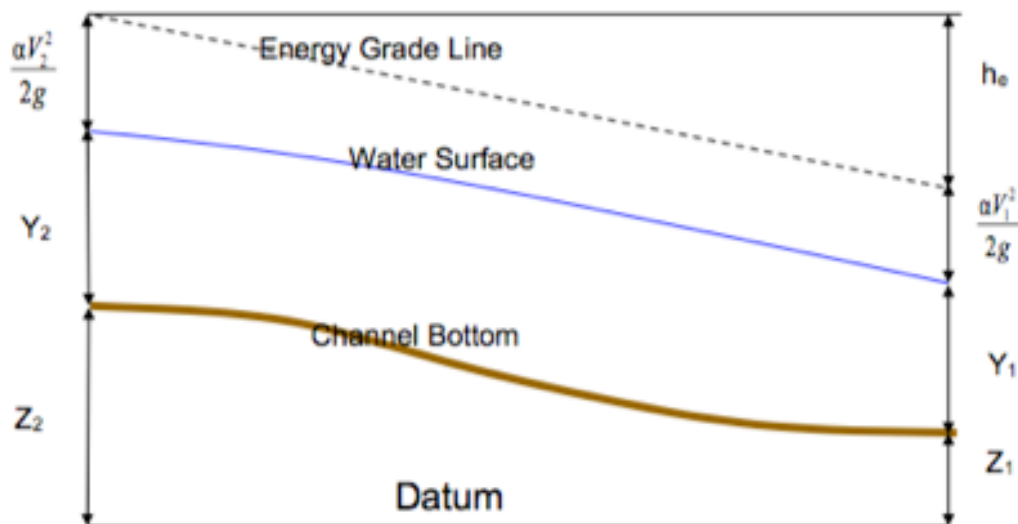
dimensjonal energi. Energien som tapes blir forårsaket av friksjon (Mannings n) og kontraksjonen/ekspansjon. Ligningen for bevegelsene benyttes i situasjoner hvor profilen til vannoverflater endres hurtig. Disse situasjonene inkluderer kalkuleringer av blandede flomregimer (Brunner, 2016). HEC-RAS kan utføre endimensjonale kalkuleringer for vannprofiler i stabil, gradvis endret strømninger i naturlige eller konstruerte kanaler. Vannoverflate-profiler er beregnet kronologisk fra et tverrsnitt til neste ved å løse energiligningen med en interaktiv prosedyre kalt ”standardstegs-metoden”. Ligningen er illustrert av formel 4-6 og figur 4-25:

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

Formel 4-6: Standardstegsmetoden (Brunner, 2016).

Hvor:

- Z_1 Z_2 = Høyden til vannet ved tverrsnittene.
- Y_1 Y_2 = Dybden til vann ved et tverrsnitt.
- V_1 V_2 = Gjennomsnittshastighet (total avløp/totalstrømningsområde).
- a_1 a_2 = Koeffisienten til vekten av hastighet.
- g = Akselerasjon til gravitasjonen.
- h_e = Tapt energi.



Figur 4-25: Visualisering av energiligningen (Brunner, 2016).

Energien tapt (h_e) mellom to tverrsnitt omhandler friksjonstap og kontraksjon/ekspansjon-tap. Ligningen uttrykt i formel 4-7:

Formel 4-7: Ligning for tapt energi (Brunner, 2016).

$$h_e = L\bar{S}_f + C \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g}$$

Hvor:

L = Vekten til utløp for elvebredde.

\bar{S}_f = Representativ skråningsfriksjon mellom to tverrsnitt.

C = Koeffisient for tap gjennom kontraksjonen og ekspansjon.

Strømningene i hovedkanalen blir ikke inndelt, bortsett fra i tilfeller hvor koeffisienten til ruheten forandres i kanalen. Programmet tester anvendeligheten for inndeling av ruheten innad i tverrsnittet i hovedkanalen, der den ikke er anvendelig, vil ikke programmet bestemme den sammensatte n i hovedkanalen. Programmet kan avgjøre om en del av hovedkanalen og et valgt tverrsnitt skal bli inndelt eller om den sammensatte n -verdien til hovedkanalen skal bli benyttet i følgende tilfeller; Hovedkanalens sideskråninger er brattere enn 5H:1V, eller om hovedkanalen har flere n -verdier, i slike tilfeller vil det beregnes en sammensatt motstand n . Brattheten til sideskråninger blir brukt i HEC-RAS for å definere den horisontale distansen ved siden av n -verdiens stasjoner innenfor hovedkanalens høydeforskjeller mellom to stasjoner (Brunner, 2016).

4.19 Nevina

4.19.1 Generelt

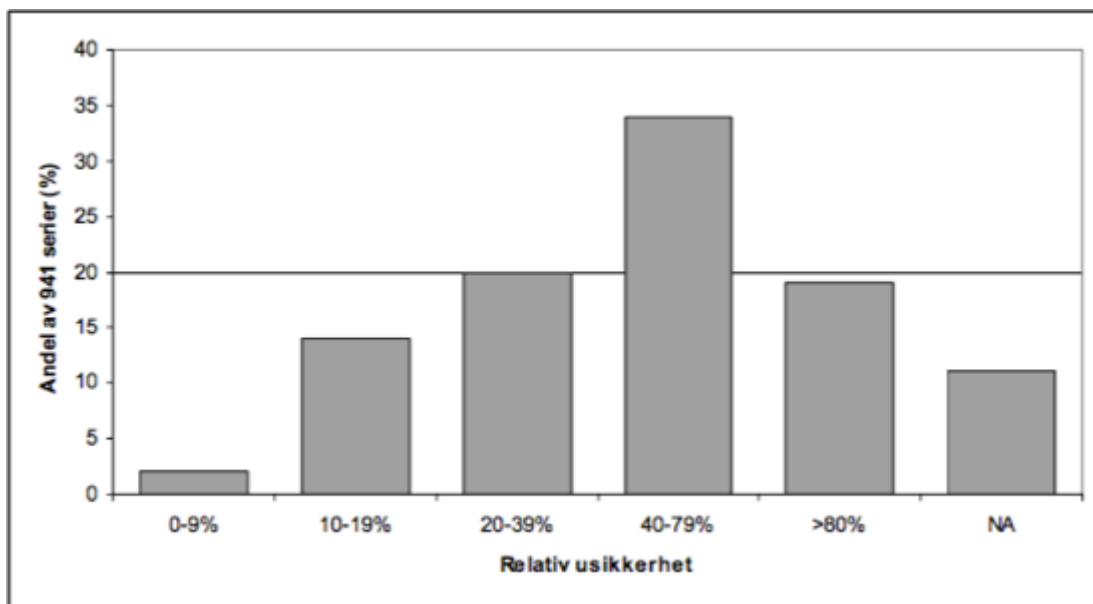
NVE har utviklet et program som kan generere informasjon for umålte felt, og noen av verdiene som genereres er; Areal, Elvelengde, i tillegg til en gjennomsnittlig vannføring for årene 1961-1990. Verdiene kan senere bli brukt i analyser dersom de plottes inn i et hydrologisk program (Nevina, 2015). NVE beskriver Nevina (Nedbørsfelt- og vannføringsindeksanalyse) som den fremtidige tjenesten for gjennomføring av hydrologiske analyser for nedbørsfelt. Nevina beregner automatisk et utvalg av klima- og feltparametre for et valgfritt nedbørsfelt i Norge. Verdier som alminnelig lavvannsføring og andre lavvannsindeks er blir generert automatisk. Et nedbørsfelt i Nevina blir oppfattet som irregulært og kan derfor inneholde feil (Ibid). I denne masteroppgaven ble verdiene fra Nevina plottet inn i flomanalysen i HEC-RAS.

Engeland et al., (2008) gjennomførte undersøkelser for 941 vannføringskurver, der kvaliteten for lavvannføringer ble undersøkt. Kvaliteten ble anslått i form av kurveusikkerheter ved hjelp av laveste vannføringsmålinger, deretter ble vannstandens årlige minimumsverdier tatt ut. Årlige minimumsvannføringer (H_L) middelvei ble beregnet sammen med den tilhørende vannføringen $\widehat{Q}(H_L)$ samt 95 % konfidensintervall bestemt av øvre $\widehat{Q}^{\frac{95}{U}}(H_L)$ og nedre grense $\widehat{Q}^{\frac{95}{L}}$ i tilhørende posteriori fordeling. Etter dette kan følgende statistikk B bli brukt for å beskrive relativ usikker for vannføring:

Formel 4-8: Ligning for å beskrive relativ usikkerhet på lavvannføring (Engeland et al., 2008).

$$B = \frac{\widehat{Q}^{\frac{95}{U}}(H_L) - \widehat{Q}^{\frac{95}{L}}(H_L)}{\widehat{Q}(H_L)} \times 100$$

Rapportfunnene indikerer at i overkant av 40 % av vannføringskurvene har en relativ usikkerhet på mindre enn 40 %. Dette indikerer hvilke krav som må settes til kvaliteten på estimerte lavvannsindeks for umålte felt. Det forventes at det ikke kan oppnås en lavere usikkerhet enn omkring 20 % (Engeland et al., 2008). Fordelingen av usikkerhet tilknyttet vannføringskurvene indikeres i figur 4-26.



Figur 4-26: Relativ usikkerhet tilknyttet vannføringskurver (Engeland et al., 2008).

Lavvannsverdiene kvalitet ble klassifisert som vist i tabell 4-8, og i analysen til Engeland et al., 2008 ble data med veldig dårlig kvalitet utelatt.

Tabell 4-8: Klassifisering av datakvalitet (Engeland et al., 2008).

Bredde av kredibilitetsintervall	Kvalitetsklasse
0-9 %	Meget Bra
10-19 %	Bra
20-39 %	Tilfredsstillende
40-79 %	Dårlig
< 80 %	Veldig dårlig

Nevina bruker flere ulike parametere og for å få grunnleggende forståelse av disse vil de mest sentrale bli gjennomgått i de påfølgende kapitlene.

4.19.1.1 Feltareal

Feltareal (A) er arealet til nedbørfeltet (km^2), og kan måles enten ved forskjellige GIS-verktøy eller ulike kartløsninger, som eksempelvis NVE sin karttjeneste nevina.nve.no. Veilederen til NVE nevner at nedbørfeltet kan ha usikre grenser der hvor det er myr eller tjern som drenerer til to ulike vassdrag. Usikkerhetsmomentene kan kontrolleres ved hjelp av befaringer i området. Om det er mange flate områder i feltarealet, kan det være vanskelig å bestemme dette dersom det kun brukes kart eller flyfoto (Stenius & Glad, 2015). Nedbørsfeltet blir beregnet gjennom en høydemodell med oppløsning 25x25 meter (Tveiterå, 2016).

4.19.1.2 Middelvannføring

Middelvannføring eller midlere spesifikk årsavløp/normalavløp (q_N) i $\text{l/s} \times \text{km}^2$, blir definert som midlere vannføring i en bestemt referanseperiode, og denne perioden er som regel 30 år, delt på feltarealet. Middelvannføringen blir bestemt ut fra feltobservasjoner eller ut fra avrenningskart for en 30 års periode, som i dag er fra 1961-1990. For bruk av avrenningskartet er dette tilgjengelig gjennom nevina.nve.no. Et alternativ er å bruke den lengste tilgjengelige dataserien vurdert som representativ for feltet (Stenius & Glad, 2015).

4.19.1.3 Midlere årsnedbør

Midlere årsnedbør (P_N) målt i mm er den gjennomsnittlig årlige nedbøren i gjeldende normalperiode (1961-1990), som blir bestemt gjennom målinger i felt eller fra kart med oversikt over gjennomsnittlig årsnedbør fra Meteorologisk Institutt.

4.19.1.4 Feltlengde

Feltlengde eller feltaksens lengde (F_L) i km, blir definert gjennom en rett linje som går fra feltets utløp/målested til det fjerneste punktet ved vannskillet. Feltlengden blir målt gjennom samme kartgrunnlag som feltarealet (Stenius & Glad, 2015).

4.19.1.5 Elvelengde

Lengden til elva (E_L) blir definert som hovedelvas lengde definert på et kart. Hovedelva ved et samløp blir definert som den av elvene som har det største tilsigarealet. Dette arealet blir definert gjennom det samme kartgrunnlaget feltarealet.

Elvegradient eller hovedelvas gradient (E_G) blir oppgitt i m/km og er definert som $\Delta h/E_L$, der Δh er total høydeforskjell langs hovedelvas lengde E_L . Relieff-forhold (H_L) oppgis i m/km og defineres gjennom $H_{75}-H_{25}/F_L$ der $H_{75}-H_{25}$ er forklart som høydeforskjellen i meter det er mellom 35- og 75-% passasjen på (Stenius & Glad, 2015).

4.19.1.6 Konsentrasjonstid

Konsentrasjonstiden beskriver tiden det tar for vannet å renne fra nedslagsfeltets ytterste punkt til utløpet/målestedet og vil variere avhengig av feltstørrelse og feltegenskaper. Ved hjelp av rasjonal formel kan konsentrasjonstiden beregnes ved bruk av Statens Vegvesen sine formler. Under beskrives formelen som en kan bruke ved skogsområder, men ikke ved bebygde områder.

Formel 4-9: Formel for utregning av konsentrasjonstid (Stenius & Glad, 2015).

$$T_{c_{svv}} = 0,6 \times L \times H^{-0,5} + 3000 \times A_{SE}$$

Det er viktig å poengtere at denne formelen er utviklet for små felt med tilnærmet null demping (Stenius & Glad, 2015). Formelen for konsentrasjonstid ved urbane felt er uttrykt ved formel 4-10:

Formel 4-10: Formel for utregning av konsentrasjonstid i urbane strøk (Stenius & Glad, 2015).

$$T_{c_{svv}} = 0,02 \cdot L^{1,15} \cdot H^{-0,39}$$

Hvor:

L = Lengde av feltet (m).

H = Høydeforskjellen i feltet (m).

A_{SE} = Effektiv innsjøprosent (%).

4.19.1.7 Stegs-beskrivelse Nevina

Steg 1: Velg punkt

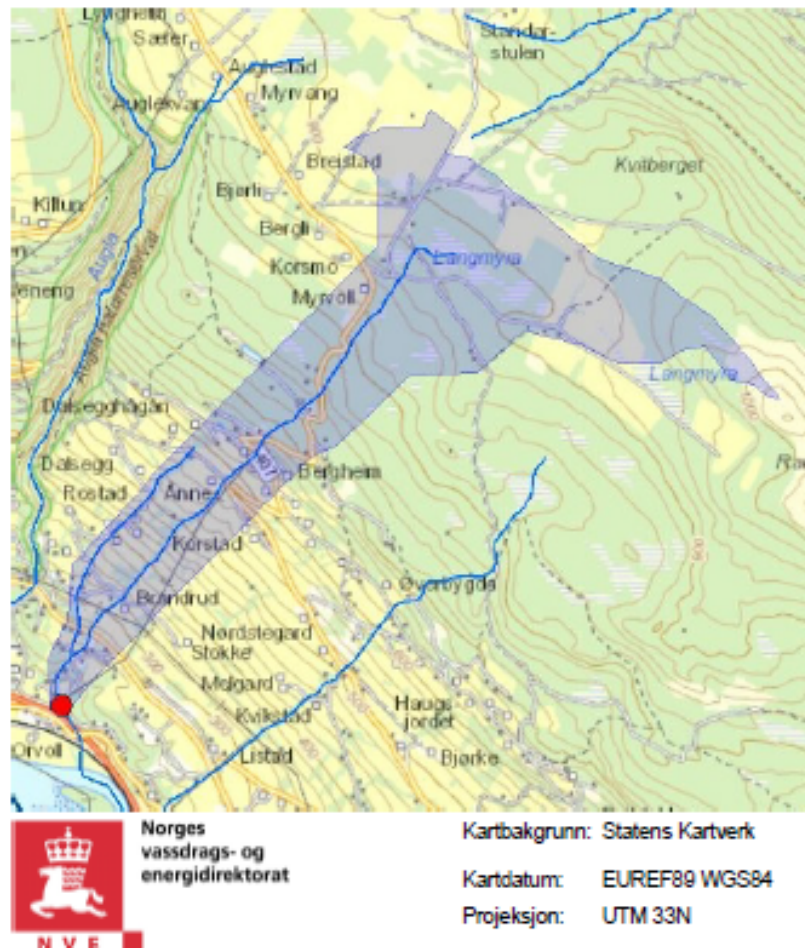
Dette steget innebærer å velge et punkt som bestemmer området som skal analyseres. Punktet ble plassert langt nedstrøms i elva, årsaken for dette var at analysen skulle foregå oppstrøms av valgt punkt, se figur 4-27. Når det velges lokalitet for punktet, er det avgjørende at punktet er så nøyaktig som mulig, slik at risikoen for feilverdier minimeres senere i analysen (Nevina, 2015).



Figur 4-27: Step 1: Velg kalkuleringspunkt.

Steg 2: Generer nedbørsfelt

Når punktet er plassert på riktig sted, trykkes det på ”Generer Nedbørsfelt” i menyen på venstre side. Normalt vil det være et område som i tillegg er generert nedenfor det valgte punktet, noe som vises i figur 4-28 (Nevina, 2015).



Figur 4-28: Step 2: Generer nedbørsfelt.

Steg 3: Rediger Nedbørsfelt

Å redigere nedbørsfelt har ikke vært nødvendig for denne analysen, derimot er det fortsatt viktig å nevne de ulike valgmulighetene denne funksjonen gir. Feltgrensene kan i noen tilfeller være ukorrekte og ved hjelp av denne funksjonen er det mulig å rette opp i feilen(ene). Om disse skal rettes opp må i hvert enkelt tilfelle avgjøres av brukeren. Om feltgrensen krysser en elv, kan det ha det blitt tegnet feil i lavvannskartet og da må nedbørsfeltet endres (Nevina, 2015).

Steg 4: Generer feltparametre

Når feltparametrene er generert vil de kalkulererte verdiene bli satt inn i en tabell, disse verdiene vises i tabell 4-9. Noe som er viktig å merke seg er at det er mulig å endre feltparametre hvis dette skulle være nødvendig i etterkant av generering. I følge brukermanualen for Nevina så er det en sjeldenhet at en får riktig minimum-høyde på grunn av det er krevende å finne nøyaktig høyde i kartet. Om det er små forskjeller i de angitte dataene kan dette gi et annet areal enn hva som er riktig og på grunn av dette kan det i tilfeller være nødvendig å kjøre prosessen på (Nevina, 2015).

Tabell 4-9: Step 4: Genererte feltparametre.

Parameternavn	Generert verdi	Editert verdi	Parameternavn	Generert verdi	Editert verdi
ObjectID	33,644	33,644	Sommertemperatur (Mai-September °C)	7,6	7,6
Vasssdragsnummer	002.DF5	002DF5	Vintertemperatur (Oktober-April °C)	- 5,95	- 5,95
Klimaregion	Ost	Ost	Temperatur - Juli (°C)	9,83	9,83
Region	Ost	Ost	Temperatur -August (°C)	10,11	10,11
Areal (km ²)	4,2	4,2	Årstemperatur (°C)	- 0,3 C	- 0,3 C
Avrenning(mm/år)	342,55	342,55	Årsnedbør (mm)	495,71	495,71
Minimum høyde (m)	189	189	Feltlengde (km)	4,5	4,5
Maksimum høyde (m)	1026	1026	Elvelengde (km)	3,83	3,83
Skog (%)	53,75	53,75	Elvegradient (m/km)	180,26	180,26
Dyrket mark (%)	39,02	39,02	Elvegradient (10-85) (m/km)	206,28	206,28
Myr (%)	2,9	2,9	Delta Hmax (m)	690,91	690,91
Snaufjell (%)	0,77	0,77	Vassdrag	Vorma-Lågen	Vorma-Lågen
Urban (%)	0,04	0,04	Kommune	Sør-Fron	Sør-Fron
Sommernedbør (Mai-September, mm)	285,32	285,32	Fylke	Oppland	Oppland
Vinternedbør (Oktober-April, mm)	210,39	210,39			

Steg 5: Generer Indekser

Ved generering av indekser fås det verdier som er viktige for den videre analysen i PQRUT (se tabell 4-10). Disse verdiene er Middelvannføring (61-90) og alminnelig lavvannføring. I tillegg vil de genererte indeksene inneholde ulike vannføringer for forskjellige nivåer av flom (Nevina, 2015).

Tabell 4-10: Step 5: Genererte indekser.

Parameternavn	Verdi $1/(s^x km^2)$	Parameternavn	Flomvann føring (m ³ /s)	95 % intervall- nedre grense (m ³ /s)	95 % intervall – øvre grense (m ³ /s)
Middelvannføring 1961-1990	10,9	Middelflom (Q _M)	1,3	0,7	2,2
Alminnelig lavvannføring	0,3	5-årsflom (Q ₅)	1,6	0,9	2,9
5-persentil (Hele året)	0,3	10-årsflom (Q ₁₀)	1,9	1,1	3,6
5-persentil (1/5- 30/9)	0,3	20-årsflom (Q ₂₀)	2,3	1,2	4,3
5-persentil (1/10- 30/4)	0,3	50-årsflom (Q ₅₀)	2,8	1,4	5,5
BFI	0,5	100-årsflom (Q ₁₀₀)	3,3	1,6	6,5
		200-årsflom (Q ₂₀₀)	3,8	1,9	7,6

5 Resultater

5.1 Nevina

I dette kapittelet vil resultatene oppnådd i Nevina gjennomgås. For å kunne bruke programmet HEC-RAS har det vært nødvendig å bruke NVE sitt program Nevina for å ha nedbørsdata for simulering i analysen. Ut fra et brukerbestemt punkt beregner Nevina ulike feltparametre for et valgt nedbørsfelt. I vår analyse har dette punktet blitt plassert ved nye E6, illustrert av figur 5-1. Gjennom forsøkene på å få det mest korrekte nedbørsfeltet ble det erfart at punktbestemmelsen er viktig for å få kalkulert riktige verdier for nedbørsfeltet. For å illustrere hvor stor påvirkning punktet har, er det i figur 5-2 illustrert hvor betydelig større nedbørsfeltet blir ved feil plassering av punkt. Om dette hadde vært utgangspunktet for analysen i HEC-RAS ville det ført til feil verdier estimert for de ulike flomstørrelsene enn det som er tilfelle med nedbørsfeltet vist i figur 5-1.

Av tabell 5-1 skiller det 1,5 m³/s mellom Q¹⁰ og Q²⁰⁰, noe som kan indikere at det er liten forskjell i estimerte verdier for nedbørsområdet vist i figur 5-1. Nevina estimerer i tillegg flommer med klimapåslag og her er det anslått at en Q²⁰⁰-flom vil ha en vannføring på 4,5 m³/s. Vi valgte i tillegg å kjøre en analyse med 5 m³/s, for å se hva som blir forskjellen mellom 3,2 m³/s og 5 m³/s. Hva som er forskjellen illustreres av kartene i kapittel 10.11.

Tabell 5-1: Flomfrekvensverdier basert på riktig plassert punkt.

	Q ^M		Q ⁵	Q ¹⁰	Q ²⁰	Q ⁵⁰	Q ¹⁰⁰	Q ²⁰⁰
	M ³ /s	l(s ^x km ²)						
Flomfrekvensfaktorer	-	-	1.28	1.53	1.80	2.20	2.56	2.96
95 % intervall øvre grense (m ³ /s)	1.9	572.3	2.5	3.1	3.7	4.6	5.5	6.4
Flomverdier	1.1	323	1.4	1.7	1.9	2.4	2.8	3.2
95 % av nedre grense (m ³ /s)	0.6	183	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4	1.6
Flommer med klimapåslag (m ³ /s)	1.5	452.7	1.4	2.3	2.7	3.3	3.9	4.5

Tabell 5-2 inneholder ulike verdier som har blitt generert av Nevina, blant disse er; Middelvannføring (1961-1990), areal, elve-lengde/gradient og feltlengde. Arealbruks-verdier for området som dyrket mark og skogdekket har blitt estimert til å dekke henholdsvis 35,7 og 56 % av det totale området beregnet.

Tabell 5-2: Vannføringsindeks, klima og feltparametre basert på plassert punkt.

Vannføringsindeks, se merknader		Feltparametere		Felt-parameter e		Felt-parametere	
Middelvannføring (61-90)	11.6 l/(s*km ²)	Areal (A)	3.3 km ²	H _{min}	197 moh.	Bre	0.0 %
Alminnelig lavvannføring	0.31 l/(s*km ²)	Effektiv sjø (S ^{eff})	0.0 %	H ₁₀	366 moh.	Dyrket mark	35.7 %
5-persentil (hele året)	0.3 l/(s*km ²)	Elvelengde (E _L)	3.8 km	H ₂₀	540 moh.	Myr	3.5 %
5-persentil (1/5 – 30/9)	0.3 l/(s*km ²)	Elvegradient (E _G)	181.1 m/km	H ₃₀	681 moh.	Sjø	0.0 %
5-persentil (1/10-30/4)	0.3 l/(s*km ²)	Elvegradient 1085 (G ₁₀₈₅)	207.7 m/km	H ₄₀	775 moh.	Skog	56.0 %
Base flow	5.6 l/(s*km ²)	Feltlengde (F _L)	4.5 km	H ₅₀	835 moh.	Snaufjell	1.0 %
BFI	0.5	Sommer-temperatur	7.4° C	H ₆₀	883 moh.	Urban	0.0 %
Klimaregion	Ost	Vintertemperatur	-6.0° C	H ₇₀	899 moh.		
Årsnedbør	498 mm	Temperatur Juli	9.7° C	H ₈₀	907 moh.		
Sommernedbør	287 mm	Temperatur August	10.0° C	H ₉₀	918 moh.		
Vinternedbør	211 mm			H _{max}	1026 moh.		
Årstemperatur	-0.4° C						

Figur 5-1 viser nedbørsfeltet beregnet med rett plassert punkt og et kalkulert nedbørsfelt på 3,3 km², med en elvelengde på 3,8 km. Om det sees på H_{min} og H_{max} er disse beregnet henholdsvis til 197 moh. og 1026 moh (tabell 5-2), noe som er en indikasjon på hvor bratt terrenget er.



Figur 5-1: Kart over rett kalkulert nedbørsfelt.

Tabell 5-3 viser verdiene kalkulert for nedbørsfeltet i figur 5-2 der verdiene for Q^{10} og Q^{200} henholdsvis er $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ og $4.8 \text{ m}^3/\text{s}$, som gir en verdiforskjell på $2,3 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabell 5-3: Flomfrekvensverdier basert på feil plassering av punkt.

	Q^M		Q5	Q10	Q20	Q50	Q100	Q200
	(m^3/s)	($\text{l}/\text{s} \times \text{km}^2$)						
Flomfrekvens faktorer	-	-	1.28	1.54	1.82	2.23	2.58	2.99
95 % intervall øvre grense (m^3/s)	2.8	489.4	3.7	4.5	5.5	6.9	8.2	9.5
Flomverdier (m^3/s)	1.6	277	2.0	2.5	2.9	3.5	4.1	4.8
95 % intervall nedre grense (m^3/s)	0.9	156	1.1	1.3	1.5	1.8	2.1	2.4
Flommer med klimapåslag (m^3/s)	2.2	387.1	2.0	3.4	4.0	5.0	5.8	6.7

Om punktet plasseres feil som i figur 5-2, vil en få et kalkulert nedbørsfelt på $5,8 \text{ km}^2$, og en elvelengde på $4,1 \text{ km}$, vist av tabell 5-4. Forskjellen mellom Q^{200} for nedbørsfeltene er på $1,6 \text{ m}^3/\text{s}$, noe som beviser at valget av punkt for beregning er essensielt for å oppnå ønsket resultat.

Tabell 5-4: Vannføringsindeks, klima og feltparametre for feilplassering av punkt.

Vannføringsindeks , se merknader		Feltparametere		Felt-parametere		Felt-parametere	
Middelvannføring (61-90)	$10.3 \text{ l}/(\text{s} \times \text{km}^2)$	Areal (A)	5.8 km^2	H_{\min}	189 moh.	Bre	0.0 %
Alminnelig lavvannføring	$0.3 \text{ l}/(\text{s} \times \text{km}^2)$	Effektiv sjø (S^{eff})	0.0 %	H_{10}	282 moh.	Dyrket mark	39.9 %
5-persentil (hele året)	$0.3 \text{ l}/(\text{s} \times \text{km}^2)$	Elvelengde (E_L)	4.1 km	H_{20}	400 moh.	Myr	2.3 %
5-persentil (1/5 – 30/9)	$0.3 \text{ l}/(\text{s} \times \text{km}^2)$	Elvegradient (E_G)	$171.2 \text{ m}/\text{km}$	H_{30}	521 moh.	Sjø	0.0 %
5-persentil (1/10-30/4)	$0.3 \text{ l}/(\text{s} \times \text{km}^2)$	Elvegradient $_{1085}(G_{1085})$	$205.0 \text{ m}/\text{km}$	H_{40}	623 moh.	Skog	52.7 %
Base flow	$5.4 \text{ l}/(\text{s} \times \text{km}^2)$	Feltlengde (F_L)	4.5 km	H_{50}	729 moh.	Snaufjell	0.6 %
BFI	0.5	Sommer -temperatur	7.8° C	H_{60}	796 moh.	Urban	0.7 %
Klimaregion	Ost	Vintertemperatur	-5.9° C	H_{70}	843 moh.		
Årsnedbør	493 mm	Temperatur Juli	10.0° C	H_{80}	893 moh.		
Sommernedbør	284 mm	Temperatur August	10.3° C	H_{90}	908 moh.		
Vinternedbør	209 mm			H_{\max}	1026 moh.		
Årstemperatur	-0.2° C						

Tabell 5-2 og 5-4 har noen forskjeller som er verdt å nevne. Blant annet er middelvannføringen for perioden 1961-1990 estimert til 10,3, arealet har økt til 5,8 km², og H_{-min/max}, er henholdsvis 189 og 1026 moh.



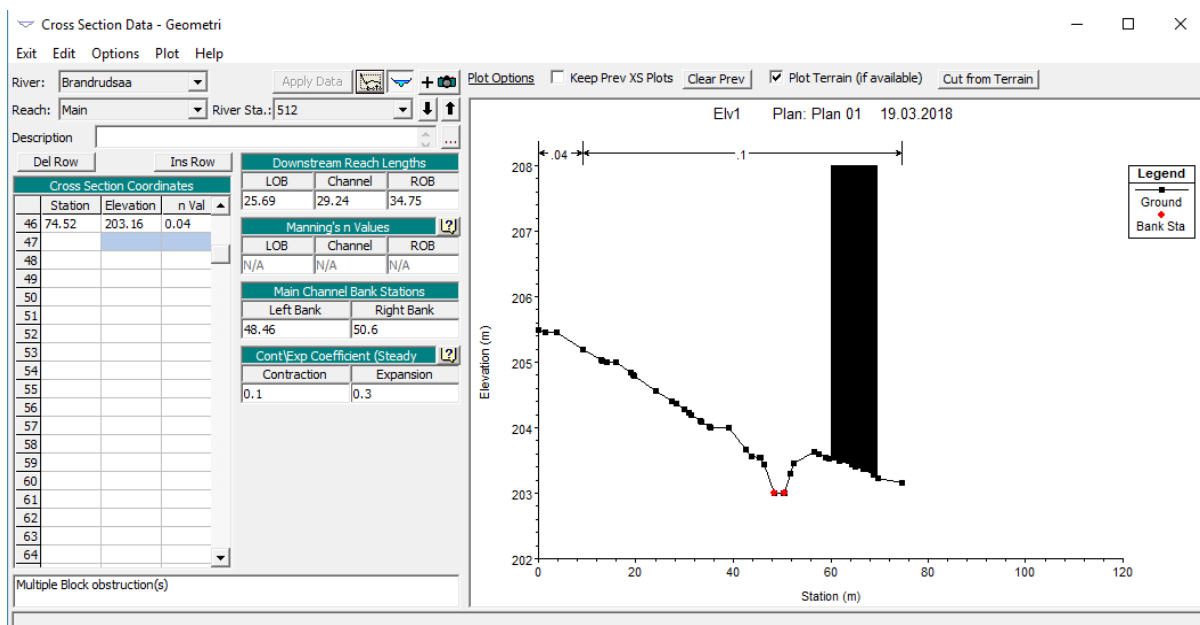
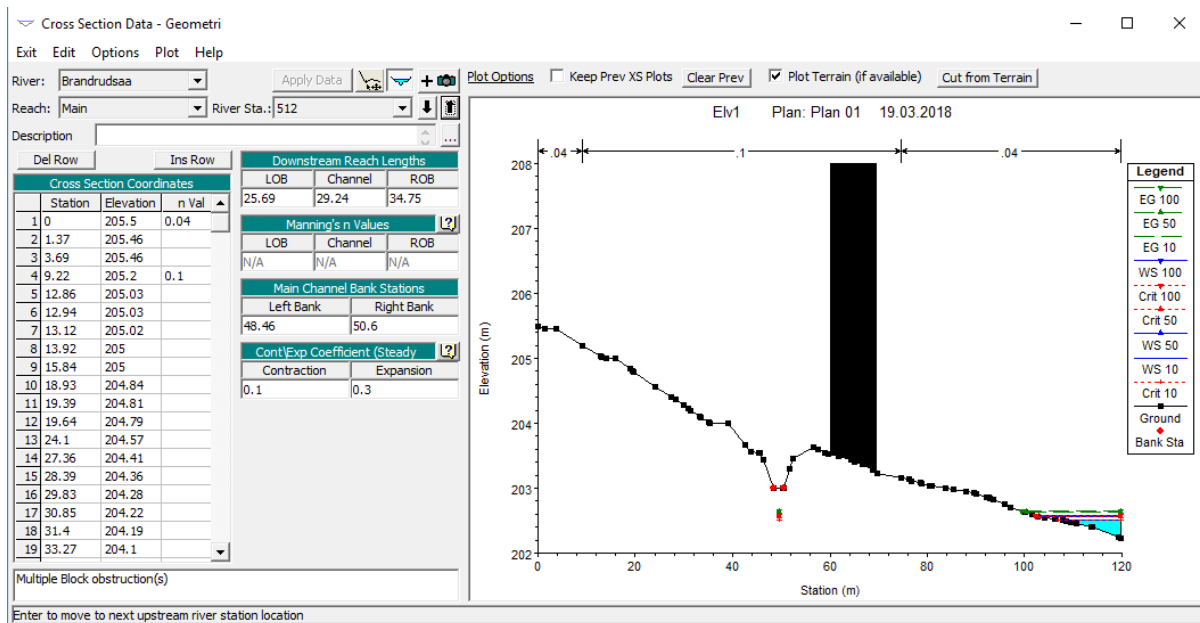
Figur 5-2: Kart som illustrerer hvordan arealet utvides ved feil plassering av punkt.

5.2 HEC-RAS

I dette kapittelet vil resultatene for analysen i HEC-RAS bli gjennomgått. Først vil det bli fokusert på de ulike parameterne som har blitt konstruert. I denne analysen har det blitt brukt to typer kulverter, der disse er illustrert av figur 5-7 og 5-8. Gjennom brukerveiledningene til Brunner (2016) har det blitt hentet ut verdien for Mannings n som er brukt som ruhetskoeffisient for kulvertene. Mannings n -verdiene er hentet ut av tabellen i appendiks B. For å bedre forklaringsvevnen vil det i resultatene brukes ulike veinavn som; Kvarvvegen, Eksisvegen og Ysterivegen.

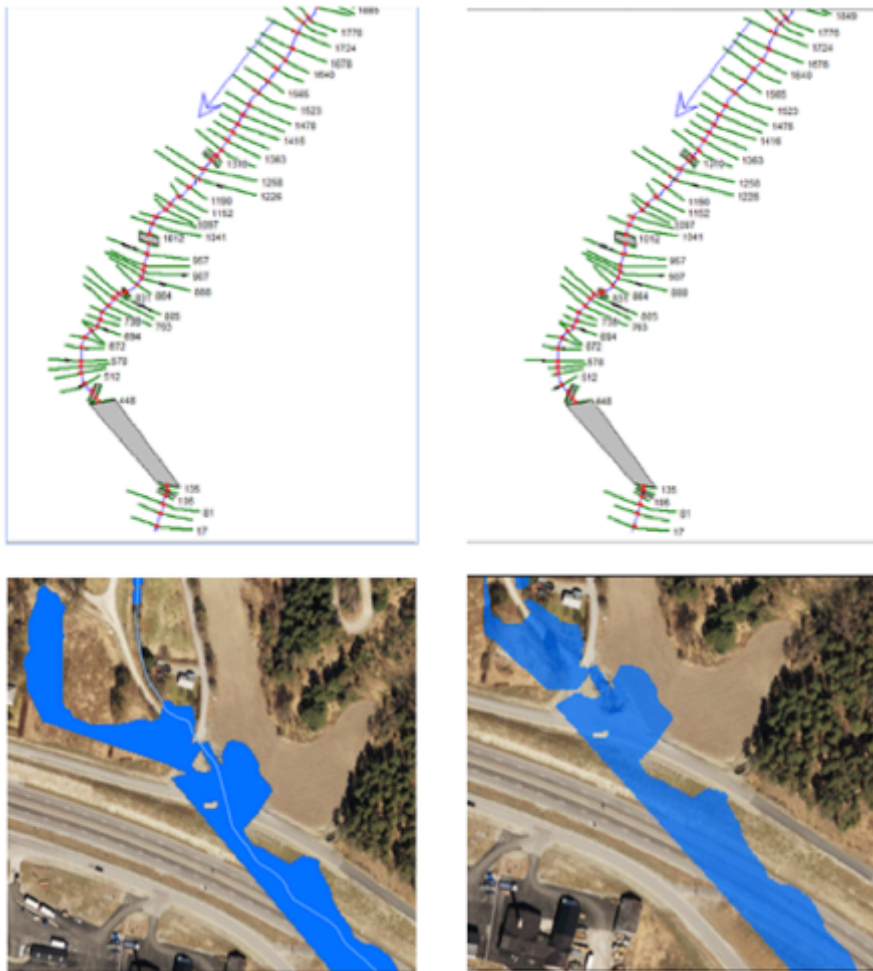
5.2.1 Tverrsnitt

Etter første gjennomkjøring av analysen oppdaget vi at vannutbredelsen var større enn ønsket. Derfor ble det gjort endringer på tverrsnittene der disse ble kortet ned og forlenget etter hva som var nødvendig. En årsak til endringene var at vannet noen steder hadde samlet seg opp på lavere steder enn elvekanalen. Hvilke endringer som er gjort illustreres av figur 5-3.



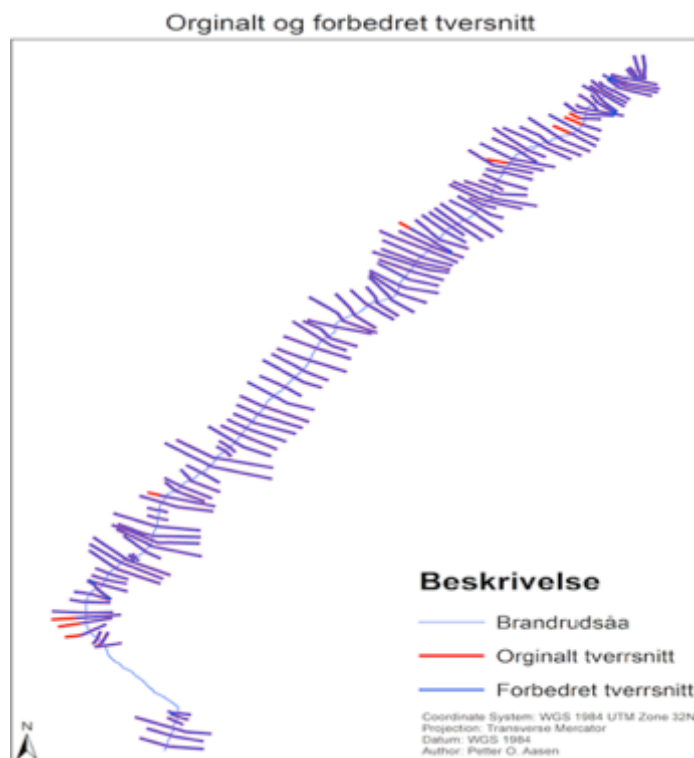
Figur 5-3: Før og etter kutting av tverrsnitt.

Som nevnt førte det opprinnelige tverrsnittet til vannoppsamling i områder som ligger lavere enn elvekanalen, som en løsning på dette gjorde vi forsøk på å ”presse” elva inn i rett løp, noe som skulle medføre at vannet gikk i riktig løp og at resultatet skulle bli et mer nøyaktig strømningsmønster. Etter eksperimentering fant vi en løsning som innebar at det var mulig å kutte tverrsnittet til ønsket lengde, dette illustreres i figur 5-3 og 5-5.



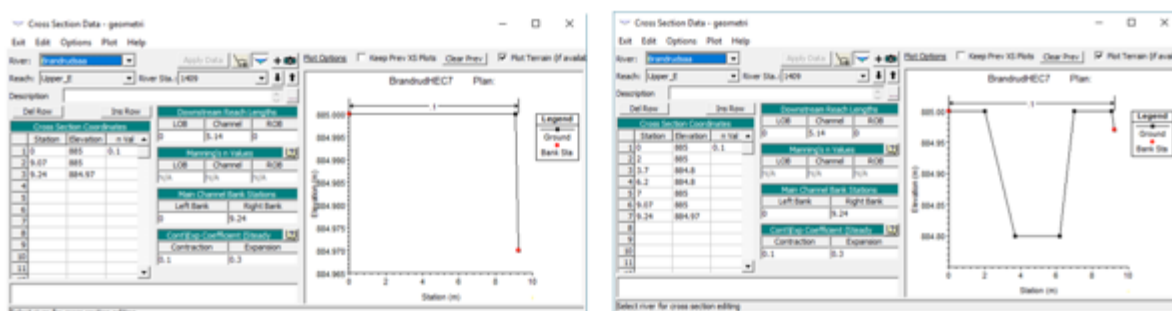
Figur 5-4: Før og etter forbedring av tverrsnitt.

Med opprinnelig tverrsnitt illustrert av venstre side i figur 5-4, har vannet fått en tydelig oppstrøms utstrekning av kulverten. I det gjeldende området er det to kulverter; en går under Ysteriveien som kommer fra oversiden og under nye E6 går det en kulvert med to løp. En årsak til dette kan være at gjennom de opprinnelige tverrsnittene har vannet fått en for sterk utstrekning til siden. Forkortede tverrsnitt har fortsatt resultert i en sideveis utstrekning av vann, men denne utstrekningen er vesentlig mindre. Området som er i nær tilknytning til Ysterivegen har blitt kraftig forstørret enn hva som var tilfelle med opprinnelig tverrsnitt. Som nevnt ble det gjort gjentatte forsøk på å optimalisere tverrsnittene etter den første simuleringen. Endringene ble gjennomført der resultatet for vannutbredelsen ikke stemte helt med terrenget og der utbredelsen til vannet var for langt ut fra kanalen. Figur 5-5 viser hvilke endringer som ble gjort med tverrsnittene før kulverten med to løp. Originalt og forbedret tverrsnitt er vist henholdsvis med rødt og blå farge. Det som vises nedstrøms er at tverrsnittene er sterkt forkortet i et forsøk på å få rett vannmønster.



Figur 5-5: Oversikt over tverrsnitt før og etter forbedring.

De forbedrede tverrsnittene viste i etterkant en mer naturlig avrenning enn med de originale tverrsnittene som er indikert med rød linje. Oppholdet i tverrsnittene vist i figur 5-5, er der på grunn av at elva renner i en to-løps kulvert. Figur 5-6 viser endring i tverrsnittene som er forårsaket av at det har blitt ekstrahert høydeverdier fra høydemodellen og det samme blir gjort for elveskjemaet. Denne endringen fører til at lagene blir endret fra 2D til 3D, og de nye lagene vil komme opp i ”table of contest”.

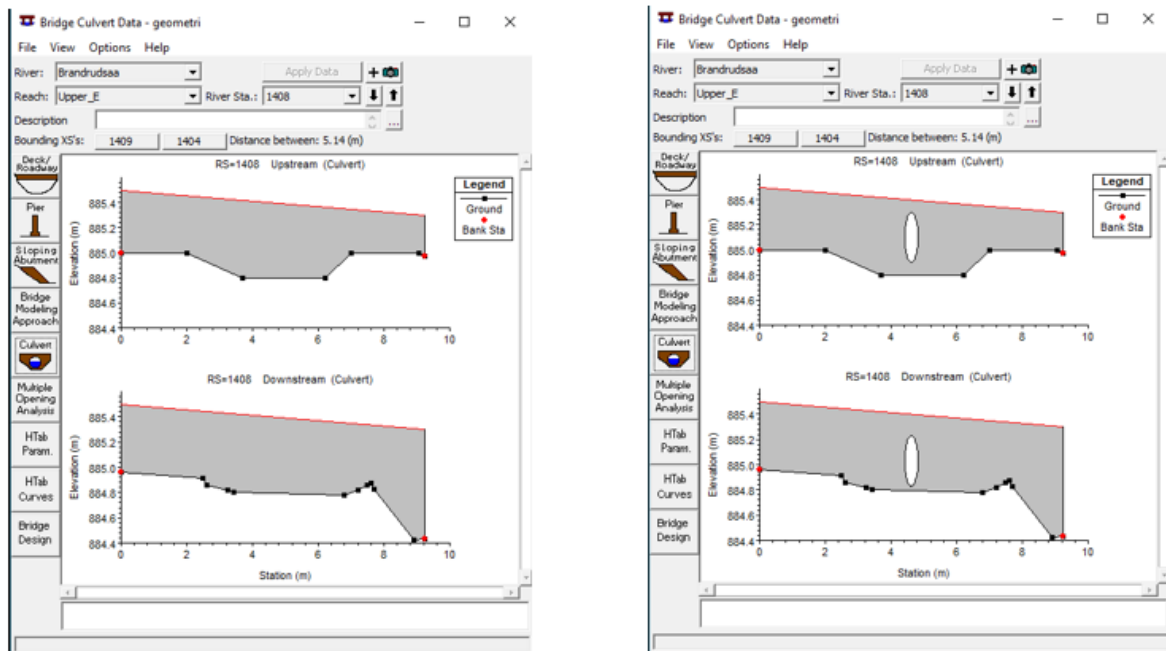


Figur 5-6: Tverrsnitt før og etter endring av høyde.

5.2.2 Kulverter

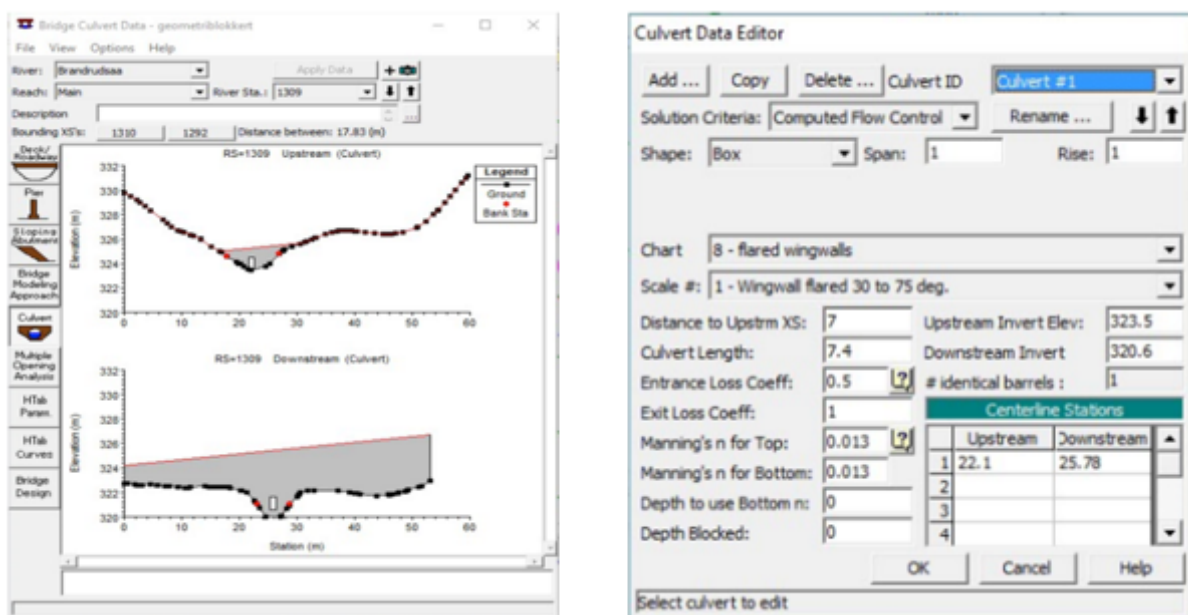
I starten av konstruksjonen hadde vi problemer med å få kulverten visualisert i modellen i figur 5-7. Årsaken bak dette var at vi hadde misforstått hvilken høyde som skulle bli inntastet. Første gangen tastet vi inn høyden som vi ville at kulverten skulle være under veien, men det

viste seg etter nærmere undersøkelser at det skal brukes meter over havet for inntasting av kulverthøyde. Etter dette var det problemfritt å konstruere kulvertene.



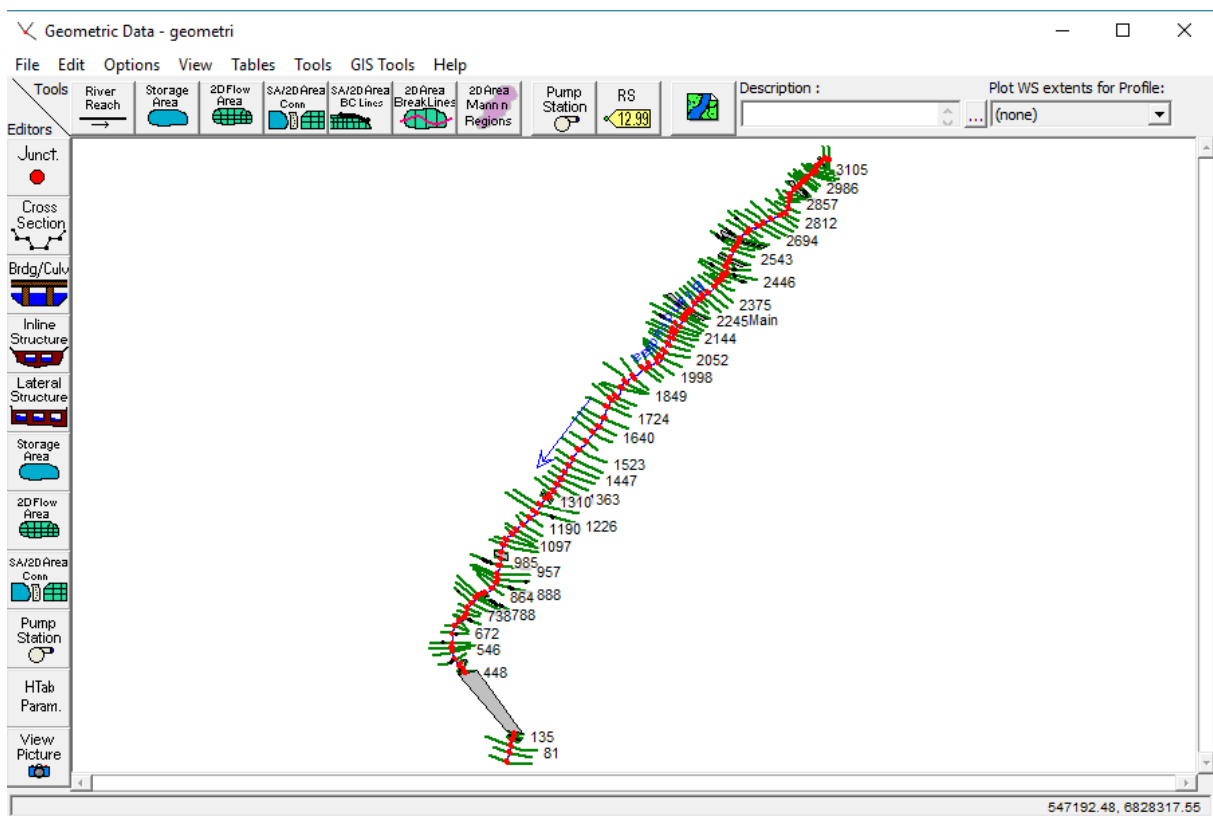
Figur 5-7: Illustrasjon av tverrsnitt før og etter kulvert.

Som nevnt i kapittel 4.17.1 er det flere forskjellige typer kulverter en kan velge, i dette eksemplet er det valgt ”box”. Hver kulvert-type og form er bestemt av ”Federal Highway Administration Chart Number”, og derfor er det bare mulig å velge dem som er tilgjengelig gjennom nedtrekks-menyen. I det her tilfelle er det valgt ”8 – flared wingwalls”. Kulverten i figur 5-8 har blitt gitt følgende egenskaper.



Figur 5-8: Illustrasjon av kulvert med dataeditor.

I likhet med "Chart" er også "Scale" bestemt av samme organisasjon, her er "1 – wingwall flared 30 to 75 deg" valgt på bakgrunn av tabellen i kapittel 10-13. Gjennom verktøyet "distance" i ArcMap har det blitt målt en avstand fra inngang kulvert til veikant på 7 m, noe som er gjort for samtlige kulverter. Kulvertlengde er satt til 7,4 m, og "entrance loss coeff" er på 0,5", i tillegg er "Exit Loss Coeff" satt til 1. Mannings n for topp og bunn er 0,013. Oppstrøms høyde for denne kulverten er satt til 323.5 m, mens nedstrøms høyde er satt til 320,6 m, noe som gir en helningsgradient på 2,9 m. "Centerline stations" er beskrevet som midtpunktet til kulverten.



Figur 5-9: Oversikt over konstruerte kulverter i elveløpet.

Oversikt over samtlige konstruerte kulverter blir gitt gjennom figur 5-9. Kulvertene er illustrert av de grå feltene. I "Deck/Roadway Data Editor" kan egenskapene til veien som kulverten passerer bli tastet inn. I tilfelle vist i figur 5-8 har distansen fra oppstrøms vei til oppstrøms tverrsnitt blitt satt til 0,7 meter, og bredden til veien er satt til 4 meter. Som default i HEC-RAS er "Weir Coef"-koeffisienten satt til 1,4, og på bakgrunn av dette lot vi denne verdien stå. Vi så under feltarbeidet at veiene har en flat og delvis krummet form, derfor ble "Broad Crested" valgt. I Brunner et al., (2016) er "U.S Embankment SS" og "D.S Embankment SS" satt til "2", hvor elementene beskriver helningsgradienten til grøftene. Vi hadde ikke verdiene tilgjengelig og derfor ble verdien "2" beholdt. "Max Submergence" er

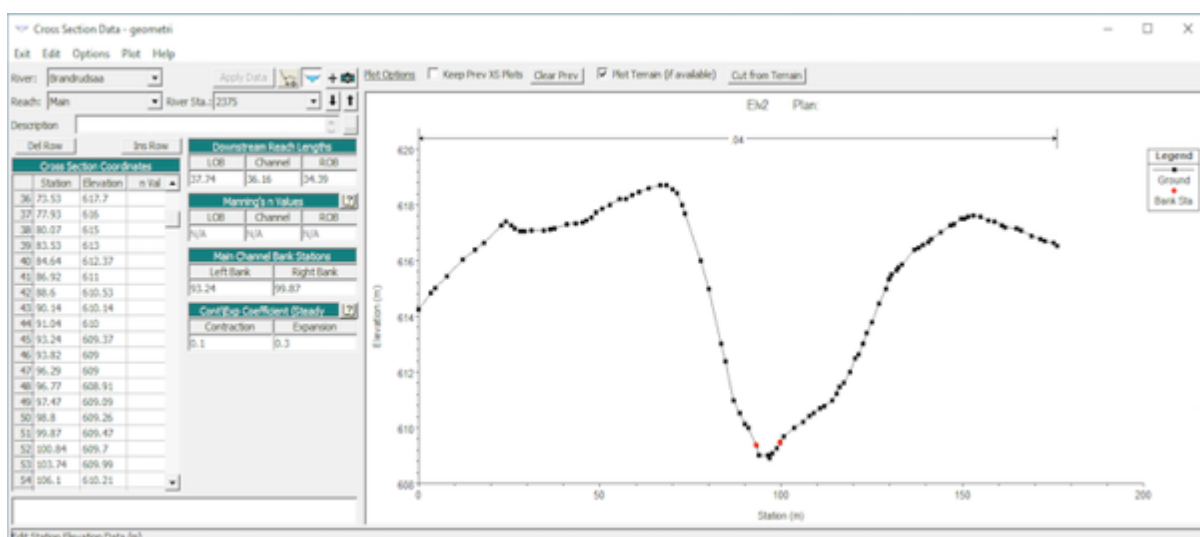
satt til 0.98, der verdien er basert på forholdet mellom vann dybden nedstrøm og oppstrøms energi, som er basert på minimum ”high cord”, vist av figur 5-10.

Upstream			Downstream		
Station	high chord	low chord	Station	high chord	low chord
1	0.	885.2	0.	885.2	
2	9.24	885.1	9.24	885.1	
3					
4					
5					
6					
7					
8					

Figur 5-10: Deck/Roadway Data Editor.

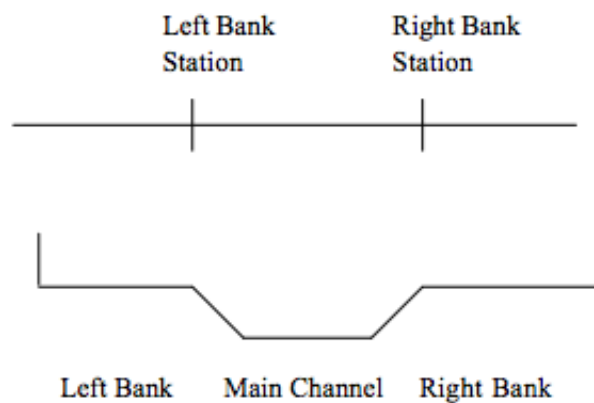
5.2.3 Bankstations

De røde punktene illustrert i figur 5-11 ble justert for å ligge ved høydeovergangen elvekanal-elveslette. Denne prosessen blir enklere hvis det sammenlignes med kartet i ”geometry editor”. En annen årsak til endringene er at i noen tilfeller var tverrsnittene flate eller hvis elvekanalen ikke var det laveste punktet. Av de digitaliserte elementene i analysen, var det bankstations som tok lengst tid på grunnnet den manuelle inntastingen.



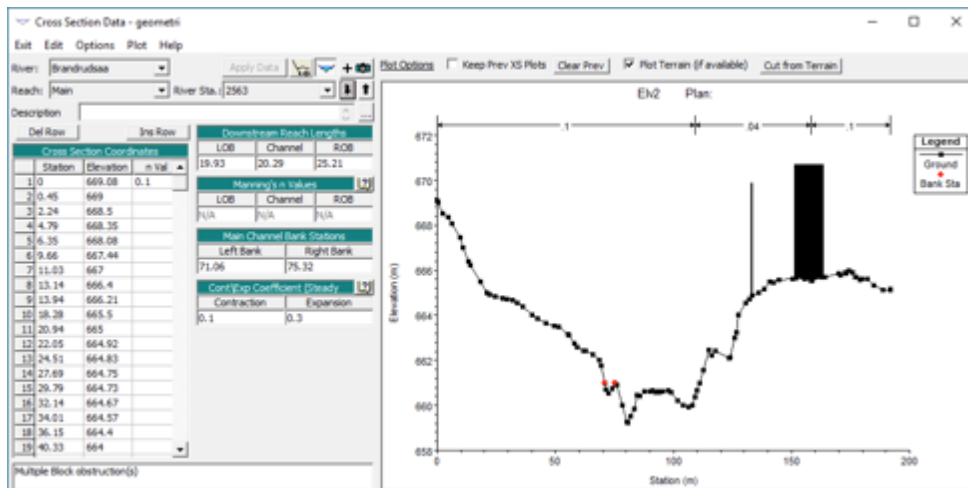
Figur 5-11: Justert tverrsnitt etter endring av bankstations.

Figur 5-11 viser resultatet av inntasting av verdier for bankstations. Det er for de stasjonene som er markert med rødt at det er blitt tastet inn en verdi. Bank stations har den funksjonen at de deler inn kanalen i tre distinkte transportsoner, en for venstre-, hoved- og høyre overbank. For å segrere ut de forskjellige transportsonene benyttes Mannings n for å avgjøre energitapet gjennom kanalen. Mellom de røde stasjonene er det blitt dannet et opphold mellom den fysiske kanalen og de flatere slettene. Normalt er det sånn at det blir gjort, men det er viktig å huske på at den rette plasseringen er der hastigheten forandres. Om det er tilstedeværelse av vegetasjon ved bankstations, kan det konkluderes med at ruheten flytter grensene mellom transportsonene.



Figur 5-12: Illustrasjon over Høyre- og Venstre bankstation og hovedkanal.

For noen tverrsnitt har det oppstått flere dype soner, og i disse tilfellene er det enkelt å konkludere uten nærmere ettersyn at det er den dypeste kanalen som skal velges. Derimot, kan dette i noen tilfeller være feil, og for å hjelpe til å avgjøre dette kan det være effektivt å vurdere hva som foregår opp- og nedstrøms av den gjeldende bankstation. Noen ganger kan det være riktig å velge den minste kanalen, og dette kan ha årsak i at det kan være et dypere område på venstre eller høyre side som illustrert av figur 5-13. Hvordan grensene mellom hovedkanal og venstre-høyre bankstation er lettere å se gjennom figur 5-12.



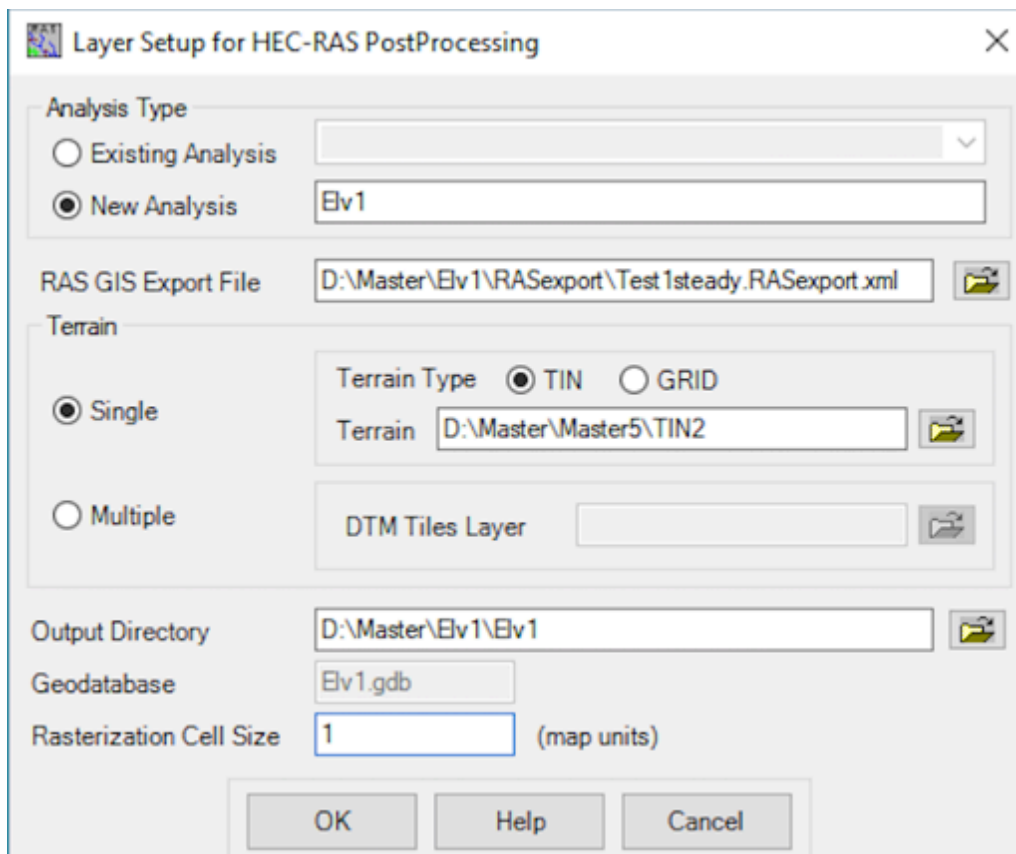
Figur 5-13: Valg av bankstasjon med flere dype områder og illustrasjon av blokkerte hindringer.

5.3 Digital høydemodell og Grid i HEC-RAS

I utgangspunktet ble det brukt en høydemodell generert TIN som bakgrunn for analysene. Det er to valgmuligheter i HEC-RAS for hva slags høydemodell som kan brukes. I tillegg til TIN, ble det også kjørt analyser ved bruk av grid. Når resultatene sammenlignes, ser en at GRID får et mer nøyaktig resultat nedstrøms enn hva som er tilfelle med TIN. Hva som er årsaken til dette er noe som blir videreført i diskusjonsdelen av oppgaven. Det hadde vært mulig i denne oppgaven å valgt en høyere oppløsning enn 1, men vi synes at 1 er nøyaktig nok i denne analysen. En høyere oppløsning kunne ført til en økt prosesseringstid og nødvendigvis ikke så mye bedre resultat.

5.4 RAS-Mapping

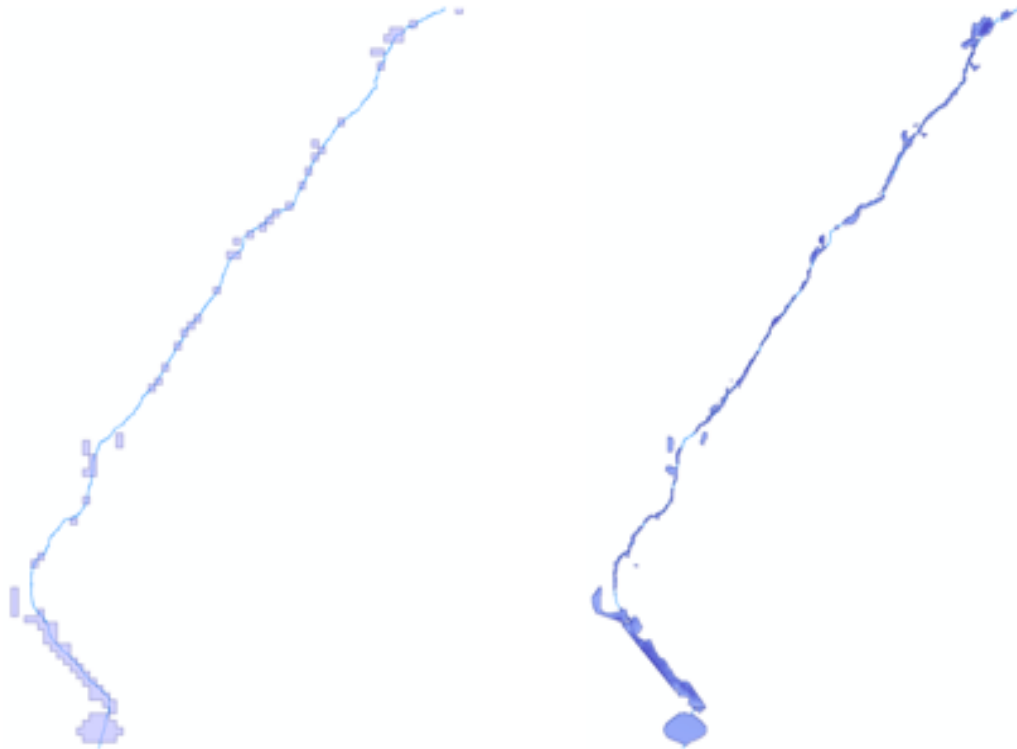
Når prosesseringen er fullført, må resultatfilen konverteres fra (SDF-format) til en lesbar fil i ArcMap (XML-format). For å kunne laste inn den lesbare filen er det nødvendig å endre "layer-setup" til det som er vist i figur 5-14. I vårt tilfelle var det fem parametere som måtte bli fastsatt. Fordi det var en ny analyse som skulle kjøres, ble det satt Elv1 som "new analysis", under "RAS-GIS Export file" ble den konverterte XML-filen innhentet. Under "terrain" ble TIN innhentet, og "Output directory" ble satt til ønsket sted for opprettelse av geodatabase. "Rasterization cell size" ble satt til 1.



Figur 5-14: Oppsett av layer i RAS-mapper.

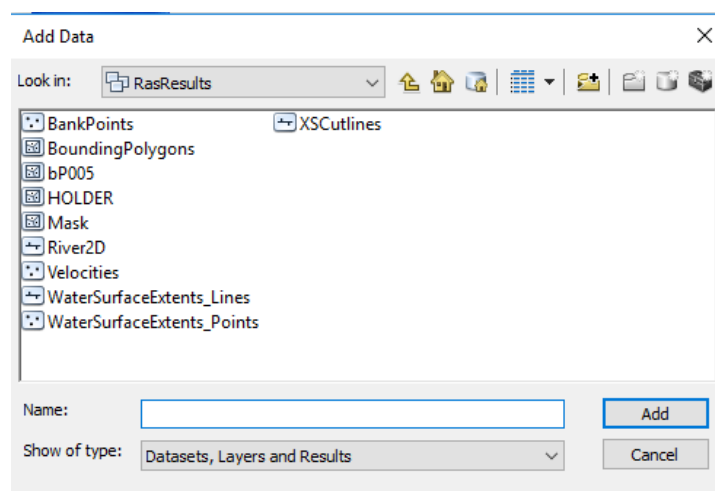
Default for "Rasterization Cell Size" er i HEC-RAS satt til 20, i første analysen ble denne verdien stående og resultatet ses i figur 5-15. Resultatet ble et usammenhengende strømningsmønster bestående av firkantede celler. En påfølgende årsak til dette er at vannmengden simulert ikke er høy nok for en slik oppløsning. I neste analyse satte vi 1 som verdi og dette førte til et mer sammenhengende strømningsmønster, det er her mindre tilfeller av firkantede celler, men i en mindre skala.

Som figur 5-15 visualiserer er det tydelig at verdien 20 fører til et resultatet som i høy grad består av oppdelte celler og en liten grad av kontinuitet i vannstrømmen. Verdi 1 har ført til et annet, men bedre resultat, hvor det har blitt en helhet i vannstrømmen. Og ikke en oppdeling av celler som var tilfelle med 20, er det derimot med 1 i stor grad fraværende. Forsøk ble gjort med 0,5 som verdi, noe som medførte i programfeil, og en mulig forklaring er at programmet ikke takler en så høy oppløsning. Hvordan resultatet av 0,5 kontra 1 er ikke klart, og det kan hende at dette ikke hadde ført til en betydelig forskjell.



Figur 5-15: Rasterization 20 versus 1.

Resultatfilen fra Ras-mapping består av filene som vist i figur 5-16, filen inneholder også et dybdepolygon for vannutbredelsen. Hvilke lag som er aktuelle avhenger av den enkelte analyse og brukerens ønske. Flomsoneanalysen i denne masteroppgaven er i all hovedsak basert på lagene "River 2D" og "bPxxx". I ulike illustrasjoner er det også brukt; Bankpoints, XSCutlines og HOLDER (se figur 5-18).



Figur 5-16: Resultatfiler fra Ras-mapping.

5.4.1 Generering av vannoverflate

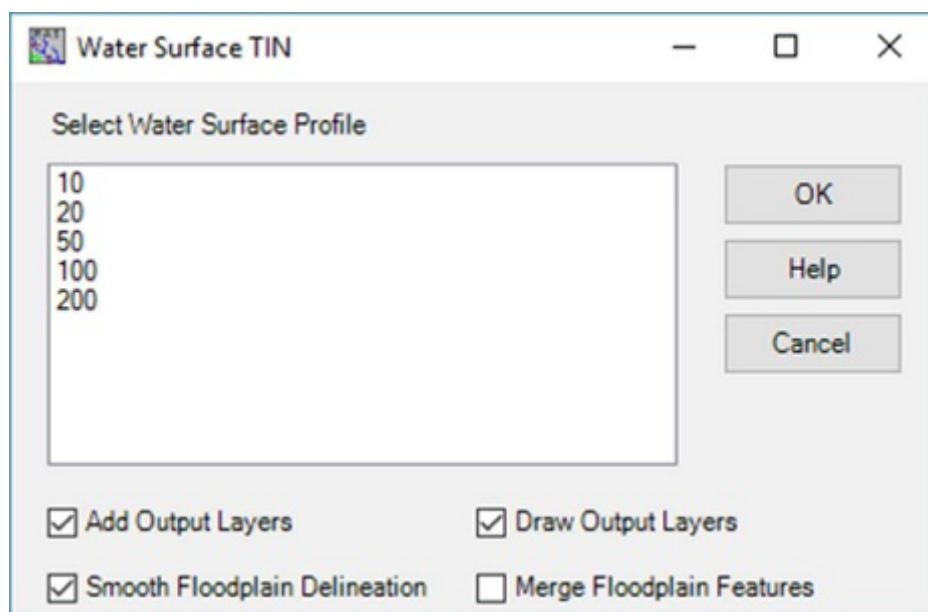
Genereringen av en vannoverflate består av flere steg, der den første er konstruering av en vannoverflate basert på TIN. Vannoverflaten blir generert på grunnlag av høydene hentet ut fra tverrsnittene. I forkant av genereringen er det nødvendig å velge de ulike

gjentakintervallene som skal analyseres, og i dette tilfelle var det de fem ulike flomnivåene som er illustrert i tabell 5-5. Dette steget krevde ingen endringer i valgmenyen i figur 5-17.

Tabell 5-5: Gjentakintervall og vannføring (m³/s).

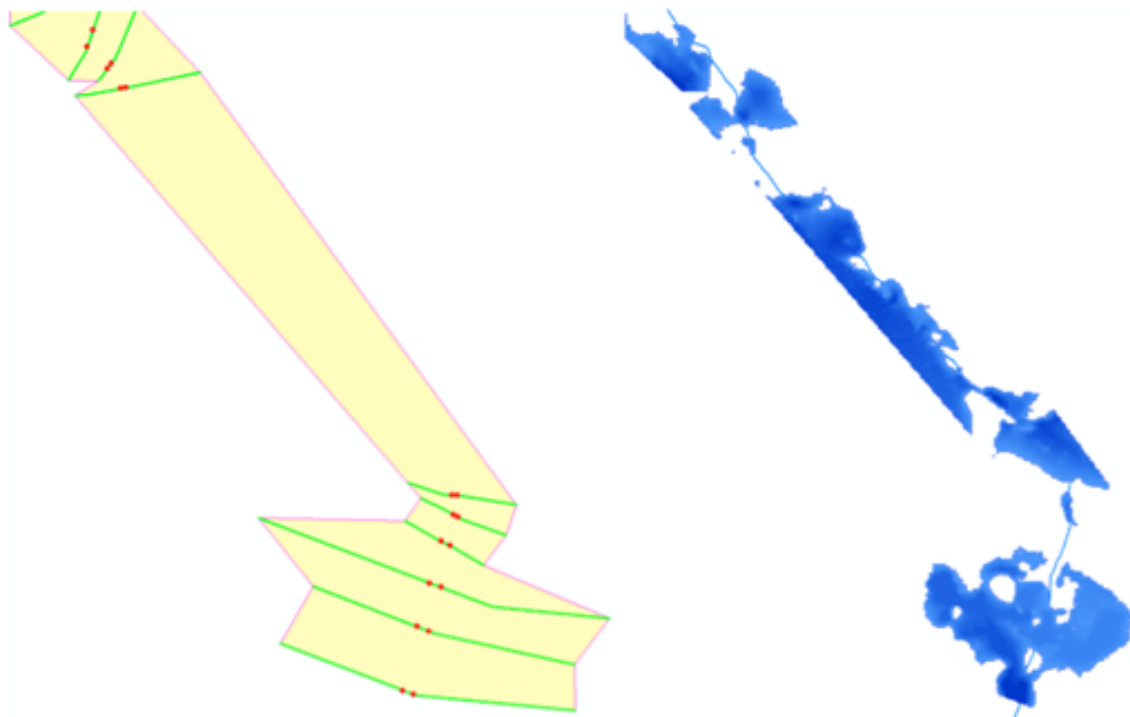
Gjentaksintervall	Vannføring (m ³ /s)
10-årsflom	1.7 m ³ /s
20-årsflom	1.9 m ³ /s
50-årsflom	2.4 m ³ /s
100-årsflom	2.8 m ³ /s
200-årsflom	3.2 m ³ /s

I etterkant av genereringen av vannoverflaten er det videre nødvendig å velge hvilke vannprofiler som skal simuleres, der de valgte vises i figur 5-17. Det er opptil brukeren om det skal gjøres en om gangen eller om alle kjøres samtidig, i denne analysen ble alle profilene kjørt samtidig. Vannprofilene er basert verdiene som er hentet inn gjennom Nevina.



Figur 5-17: Valg av ulike profiler for vannoverflate.

Uavhengig av prosessen vil det konstrueres en TIN med vannoverflate. Trianguleringen gjennom ArcGIS vil bli lagd ved bruk av tverrsnittene som fungerer som harde knekklinjer med en konstant høyde. Dette laget vil bli gitt navn "P00n" med prefiks "t". Rasterlaget med dybde vil bli gitt egenskapene "P00n" med prefiks "d". Dybden er ikke tatt med i den videre analysen, siden denne analysen er ute etter utbredelsen til flomsonene. For generering av rasterlaget ble "Smooth floodplain delineation" i menyen i figur 5-17 huket bort. Tverrsnitt, bankpoints, grensepolygon (HOLDER) og rasterlaget vises i figur 5-18.



Figur 5-18: Resultat av Inundation mapping med grensepolygon, bankpoints og tverrsnitt. I tillegg et rasterlag med vandedybde.

5.4.2 Blokkering av kulverter

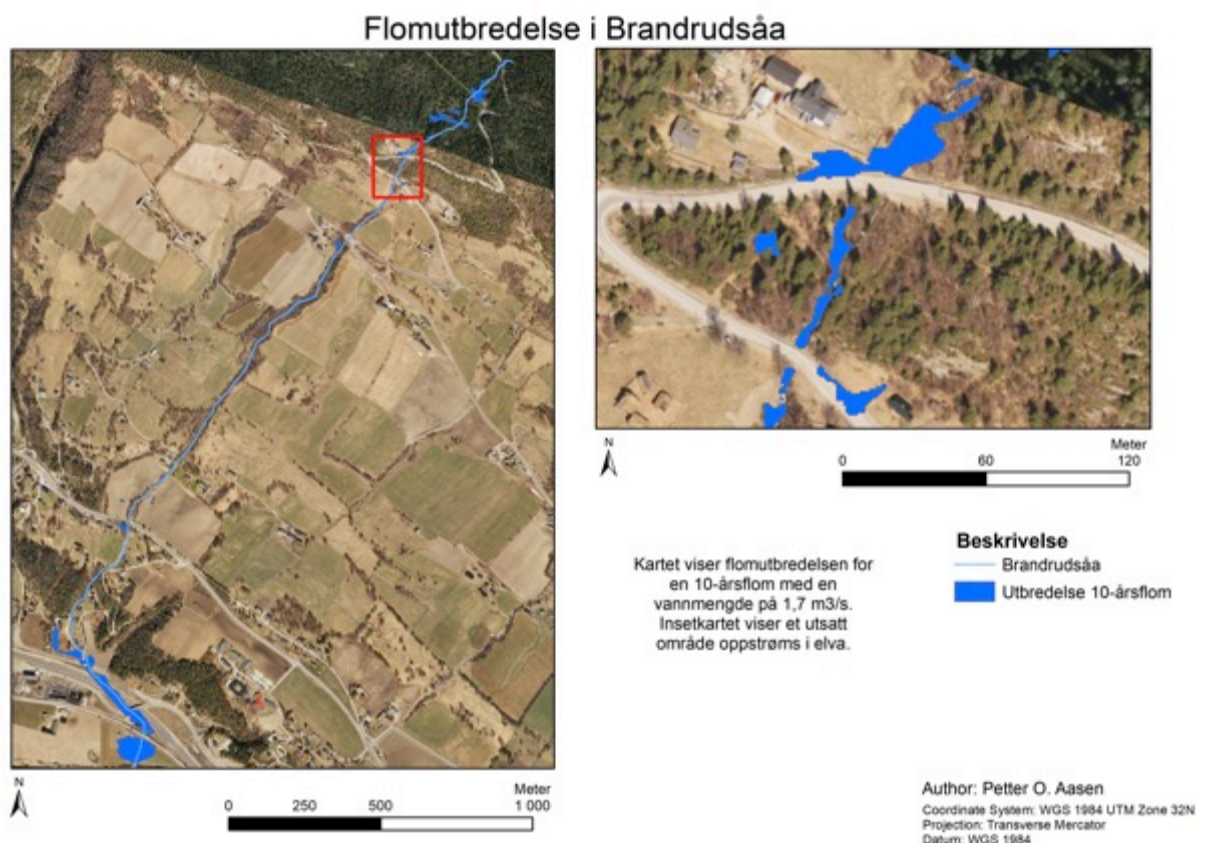
I HEC-RAS er det en egen funksjon hvor det etter ønske kan blokkeres ut kulverter. Graden av blokkert kulvert er brukerbestemt. Et ønske i denne analysen var å se på konsekvensene av totalt blokkerte kulverter, derfor ble samtlige kulverter blokkert i så stor grad som mulig. I prosessen ble det oppdaget at programmet bare aksepterer 90 % blokkering av hver kulvert, noe som vil bety at for en kulvert med en bredde på en meter vil kun 0,9 m være blokkert. Graden av blokkerte kulverter vil bli diskutert i kapittel 6.6.

Analysen har synliggjort flere sårbare områder, der de største skadene oppstår langt nedstrøm i området, deriblant ved både gamle og nye E6. Underdimensjonering av kulvertene kan være en medvirkende årsak til dette. Husstandene i området vil i mindre og større grad bli påvirket av de ulike gjentaksintervallene. Når det gjelder husstandene er det flere eksempler på at disse vil bli berørt av en eller flere av de ulike flommene som er eksemplifisert gjennom dette kapitlet. Det ses av figur 5-25 at de største vannmengdene vil samle seg opp på oversiden av veien. Grunnen til dette og hvorfor det ikke skjer på andre punkter nedstrøms er uklart. På grunn av at det er et flatere område oppstrøms kan vannet enklere samle seg opp her. De små dammene som ikke er i kontakt med det eksisterende løpet av vann, kan skyldes at vannet renner dit når flommen er på sitt største, etter hvert som flommen roer seg ned vil vannet

trekke seg tilbake, men i disse tilfellene ble vannet liggende igjen. Noe som er forekommer i andre flommer.

5.4.3 Flomutbredelse

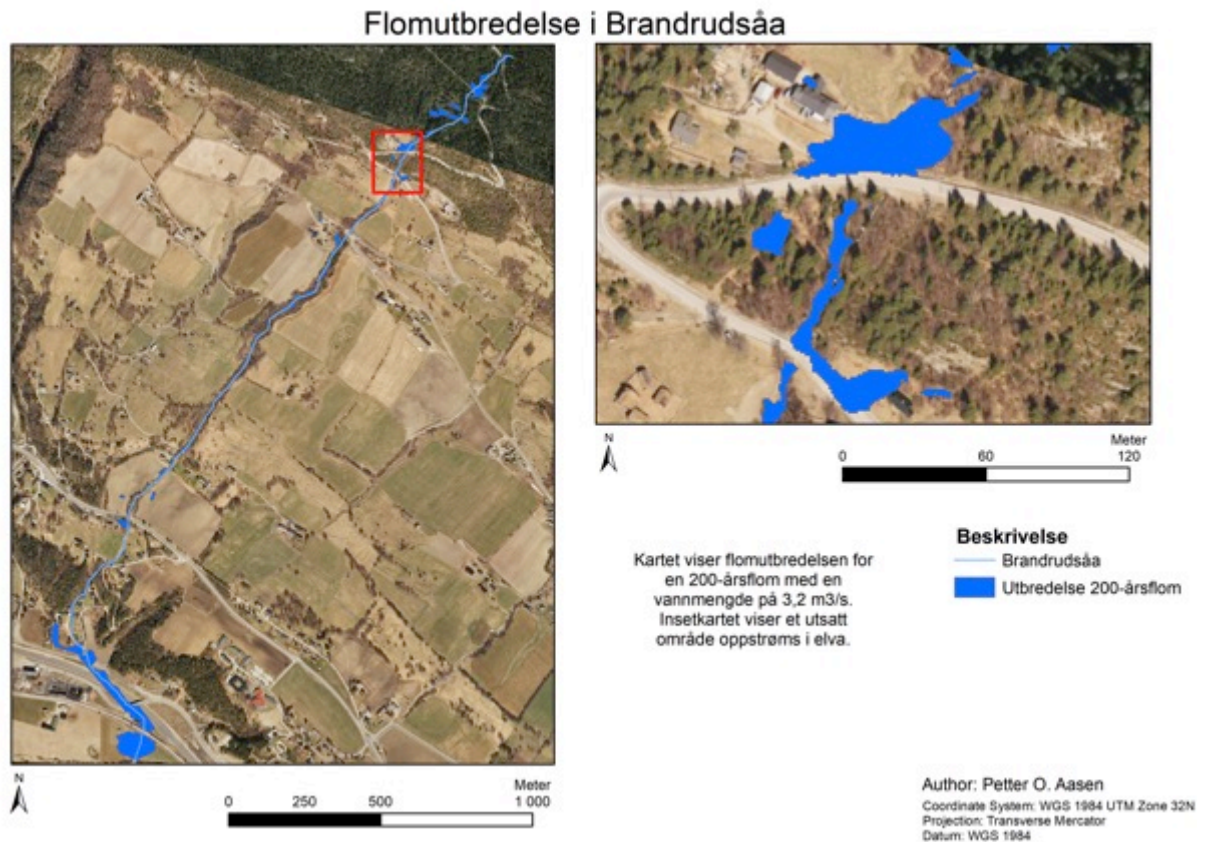
For å kunne forklare de utsatte områdene bedre, vil det gjennom dette kapittelet bli brukt vei-/stedsnavn. Kartutsnitt som illustrerer disse er vedlagt i kapittel 10.13, (kartene er hentet fra 1881). Fokuset i denne analysen har vært å se på hvilke forskjeller som oppstår mellom de ulike flomnivåene, derfor vil hovedfokuset i dette kapittelet være på 10- og 200-årsflom, i tillegg til effekten av blokkerte kulverter. Årsaken til dette er det faktum at forskjellene mellom de ulike flomnivåene er på et cellenivå, og derfor er det bedre å fokusere på laveste og høyeste gjentaksintervall. Flomsoner for 100- og 200-årsflomer og effekten av blokkerte kulverter finnes vedlagt i Appendix A, kapittel 10-1 til 10-11. Kartene som legges fram i løpet av kapittel 5.4.3 vil bestå av et hovedkart som viser hele elveløpet, og et insettkart som er zoomet inn på et utsatt område.



Figur 5-19: Flomutbredelse 10-årsflom.

Simuleringen av 10-årsflommen har vist seg å medføre et lavere skadepotensial enn sammenlignet med 200-årsflom. En 10-årsflom vil føre til en vannoppsamling oppstrøms av kulvert, og ved Kvarvvegen 238 vil vannet også ha en forlengelse nedover veien. Tendensen

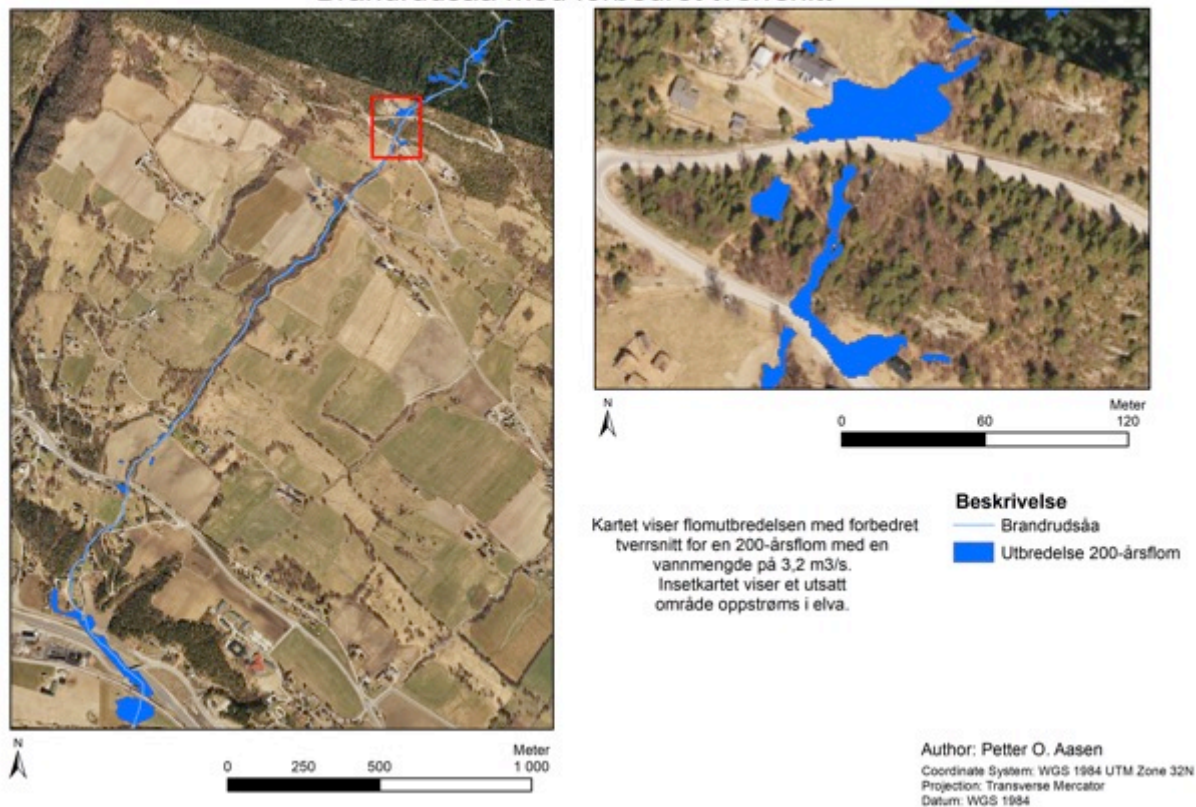
ved Kvarvvegen 200 er at det vil være en vannoppsamling på gårdsplassen. Årsaken til at vannet brer seg utover kan være overflatens helning ved gårdsplassen.



Figur 5-20: Flomutbredelse 200-årsflom.

En sammenligning av flomsonene i figur 5-19 og 5-20 viser en vesentlig forskjell i størrelse, den største forskjellen er at ved en 10-årsflom var ikke vannet i nærheten av Kvarvvegen 238. En 200-årsflom har derimot en større vannoppsamling, som kan medføre skader på huset. På venstre side av huset har det dannet seg en vannoppsamling. Grunnen til dette kan være at det rant dit da flommen var på sitt største, og ble liggende igjen da flommen trakk seg tilbake. Når det gjelder Kvarvvegen 200 er det her en større utbredelse av vann, i tillegg er det dannet en dam på baksiden av huset.

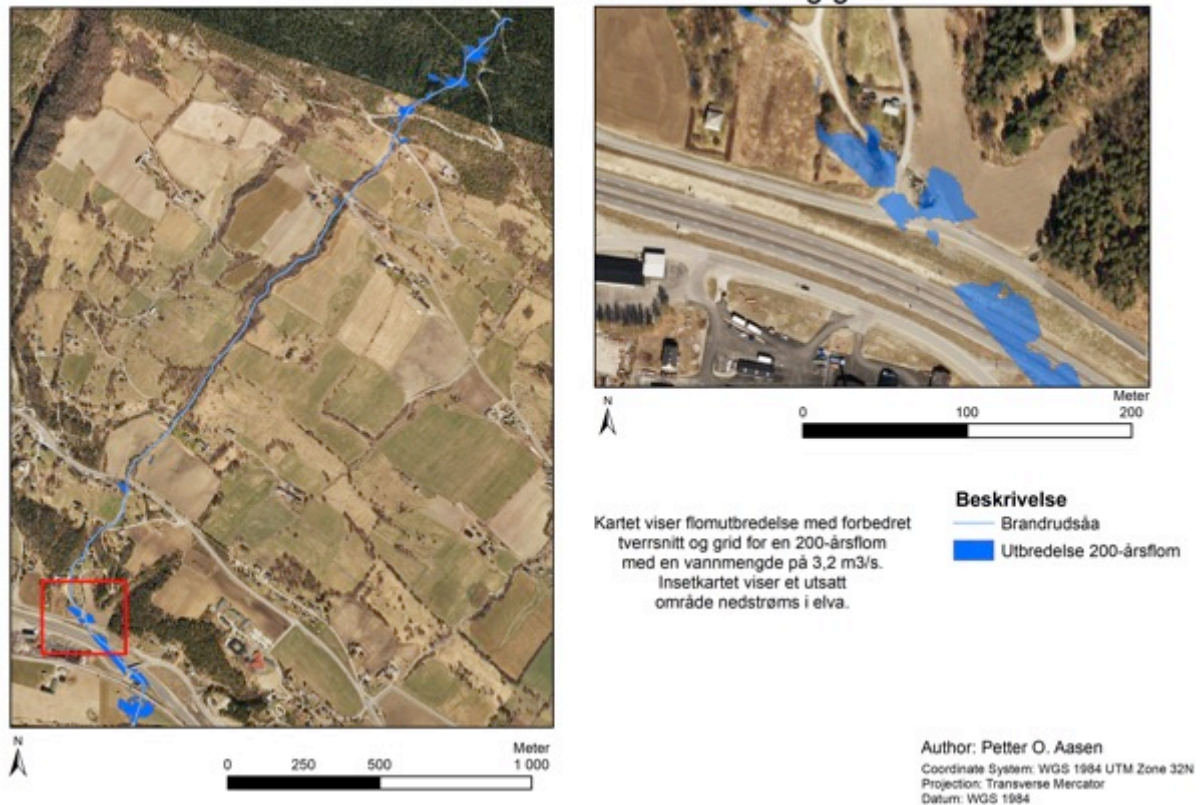
Brandrudsåa med forbedret tverrsnitt



Figur 5-21: Flomutbredelse 200-årsflom med forbedret tverrsnitt.

Til forskjell fra de foregående kartene er flomutbredelsen i figur 5-21 beregnet med forbedret tverrsnitt. Forskjellen fra de andre kartene er at det her er en sterk vannutbredelse i området i mellom svingen og husene. At tverrsnittene har blitt kortet inn kan ha medført en komprimering av vannet og kan fungere som en forklaring på den forandrede vannutbredelsen. Det er ikke en vesentlig forskjell på dammen ved huset fra normalt til forbedret tverrsnitt.

Brandrudsåa med forbedret tverrsnitt og grid



Figur 5-22: Flomutbredelse 200-årsflom med forbedret tverrsnitt og grid.

5.4.3.1 Sammenligning av modellering med flomhendelse juli 2017

For å gi denne analysen en større troverdighet er det utført sammenligninger med en virkelig hendelse. Figur 5-23 viser hvordan avsetningen av masser foregikk under hendelsen i juli 2017. Hvis dette sammenlignes med vannets utbredelse i figur 5-22 og 5-24 er det mulig å foreslå at disse har flere likhetstrekk. Figur 5-24 har også flere likheter med vannets utbredelse i figur 5-22 og 5-26.



Figur 5-23: Masser avsatt under nedbørshendelsen i Juli 2017.

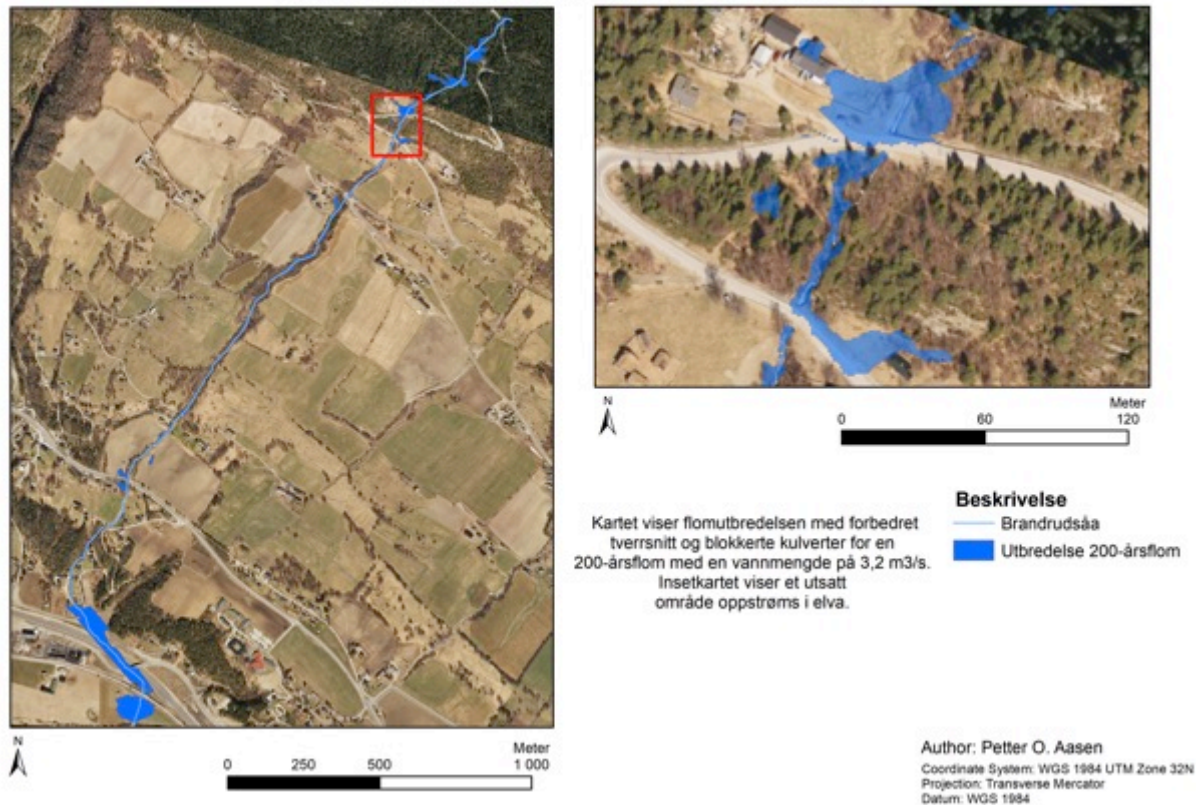
I forkant av feltarbeidet var det en stor nedbørshendelse som førte til store skader på infrastruktur, samt oversvømmelse av ulike veier i området. Noe av det som ble observert var store avsetningsmasser som hadde blitt tilført området gjennom hendelsen og vises i figur 5-23. De store mengdene avsatt illustreres godt av den gjenfylte grøfta. Hvordan massene har blitt avsatt oppstrøms av kulverten under nye E6 illustreres gjennom figur 5-29.



Figur 5-24: Vannets utbredelse under nedbørshendelen i Juli 2017 (gd, 2017b).

For analysene basert på TIN og GRID er det ingen utpreget forskjell, selv om trenden er oppstrøms i elva, Derfor er fokuset rettet mot områdene nedstrøms og analysene gjort med forbedret tverrsnitt og GRID. I all hovedsak viser figur 5-21, som er basert på forbedret tverrsnitt en sammenhengende vannutbredelse. Analysen basert på GRID i figur 5-22 viser en flomutbredelse som består av flere oppdelte områder, og der disse i stor grad dreier seg om veikrysset Ysteri-, Eksisvegen. Oppstrøms kulvert Ysterivegen er det derimot ikke en vesentlig forskjell mellom de to analysemetodene, men den største forskjellen er nedstrøms kulvert Ysterivegen. For analysen med forbedret tverrsnitt er det her et sammenhengende område over Eksisvegen og nye E6. Dette er ikke tilfelle for analysen med grid, hvor det har oppstått en oppsamling av vann på oversiden av Eksisvegen. Fra vegskulderen til nye E6 er det ikke en vesentlig forskjell fra det som er utbredelsen for analysen med forbedret tverrsnitt.

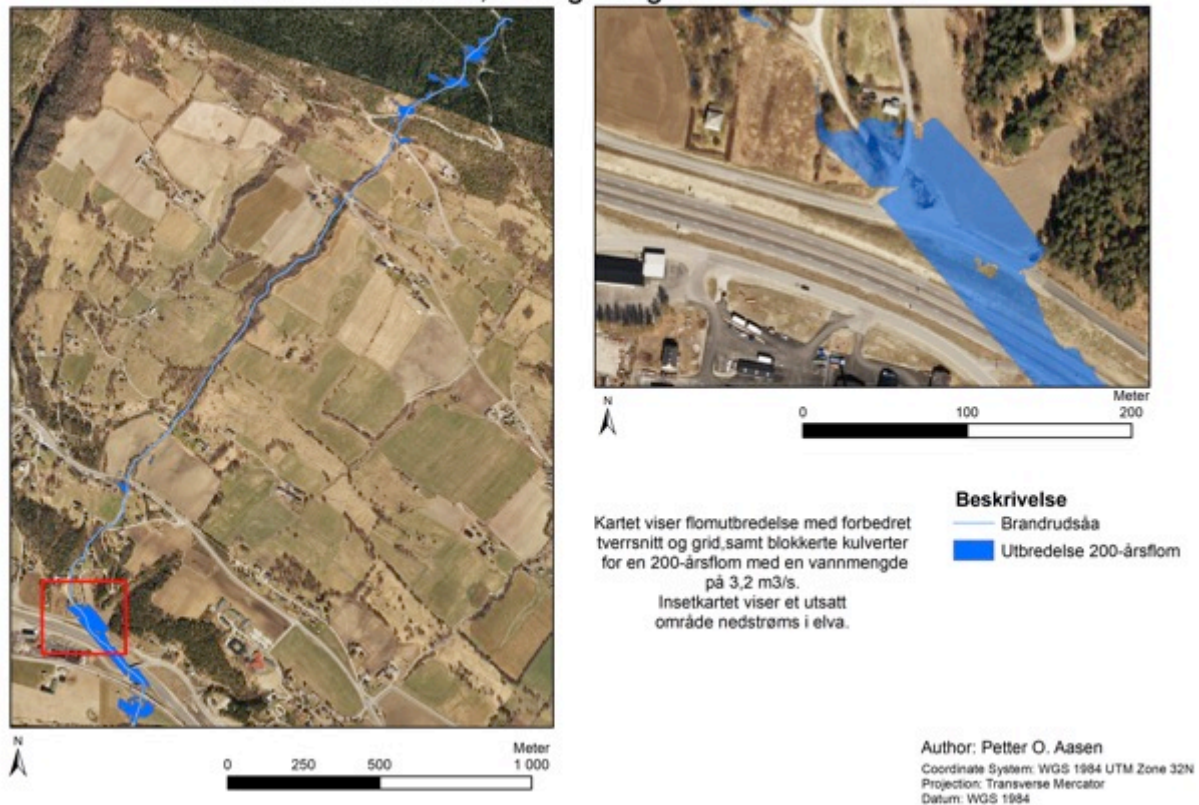
Blokkerte kulverter med forbedret tverrsnitt



Figur 5-25: Flomutbredelse 200-årsflom med blokkerte kulverter og forbedret tverrsnitt.

I en flomanalyse er det interessant å se på hvordan effekten av blokkerte kulverter, dette på grunn av at de største utbredelsene og skadene skjer i disse tilfellene. For område oppstrøms av kulvert i figur 5-25, er det en liten økning i utbredelse i flomsonen. Ved baksiden av huset i Kvarvvegen 238 har effekten av blokkerte kulverter ført til en kraftig økning i vannutbredelse, noe som kan resultere i store skader på bolig. For Kvarvvegen 200 vil det med blokkerte kulverter oppstå en sterk økning i vannvolum rundt huset. Der det uten blokkerte kulverter var en usammenhengende oppsamling, er det med blokkerte kulverter en sammenhengende vannoppsamling.

Blokkerte kulverter, med grid og forbedret tverrsnitt



Figur 5-26: Flomutbredelse 200-årsflom med blokkerte kulverter, forbedret tverrsnitt og grid.

I figur 5-25 er det simulert en analyse med forbedret tverrsnitt og blokkerte kulverter, og fokusområdet er på konsekvensene oppstrøms i elva. En analyse med forbedret tverrsnitt, grid og blokkerte kulverter er vist gjennom figur 5-26. Fokuset er her på konsekvensene nedstrøms i elva. Det blir av figur 5-26 sett på hva slags effekt blokkerte kulverter har å si for nye E6, Ysterivegen og Eksisvegen. Til forskjell fra figur 5-22 som har oppdelt vannstruktur, har blokkerte kulverter ført til en sammenhengende struktur som strekker seg fra oppstrøms kulvert i Eksisvegen og over den nye E6. Området som ligger nedstrøms av E6 er et flatere jordbruksområde og har gjennom de ulike analysene en varierende flomsone. En varierende flomsone er gjeldene for samtlige kart i kapitlene 5.4.3 og 5.4.3.1.



Figur 5-27: Skade oppstrøms av kulvert i Ysterivegen.

Analysene med blokkerte kulverter har ført til en vannoppsamling ved stikkrennen under Ysterivegen. I figur 5-27 illustreres det et område som ligger oppstrøms av denne, og her er det tydelige spor etter skadene som vannmassene og massetransporten førte til. I dette området er elvekanalen steinsatt for å hindre erosjon. Det er etter hendelsen tydelige tegn på at den steinsatte kanten er skadet av vannmassene. Gjennom figur 5-27 vises det at vegetasjonen i området har i liten grad blitt påvirket av masseavsetninger, og dette bekreftes av gressvegetasjonen og trærne oppstrøms som ikke dekt av masser. Resultatet tatt i betraktning kan det vurderes om analysen i figur 5-22 og 5-26 er overdrevet på grunnlag av mangelen på avsatte masser. Overdrivelsen kan være forårsaket av at tverrsnittene i gjeldende området har blitt forkortet som illustrert av figur 5-5. Dette kan ha resultert i en komprimering av vannet rundt kulverten.



Figur 5-28: Skader på stikkvei fra Ysterivegen.

Et av resultatene fra nedbørhendelsen i juli 2017 vises i figur 5-28, det som sees her er en kraftig underkutting grunnet erosjon av en stikkveg ut ifra Ysterivegen. Stikkrennen i bildet var under feltarbeidet fylt opp av masser. På jordet som ligger i overkant av vegen så vi under feltarbeidet en sterk avsetning av masser. Skadene oppsto på grunn av de store vannmassene som gikk i en av sideelvene til Brandrudsåa.

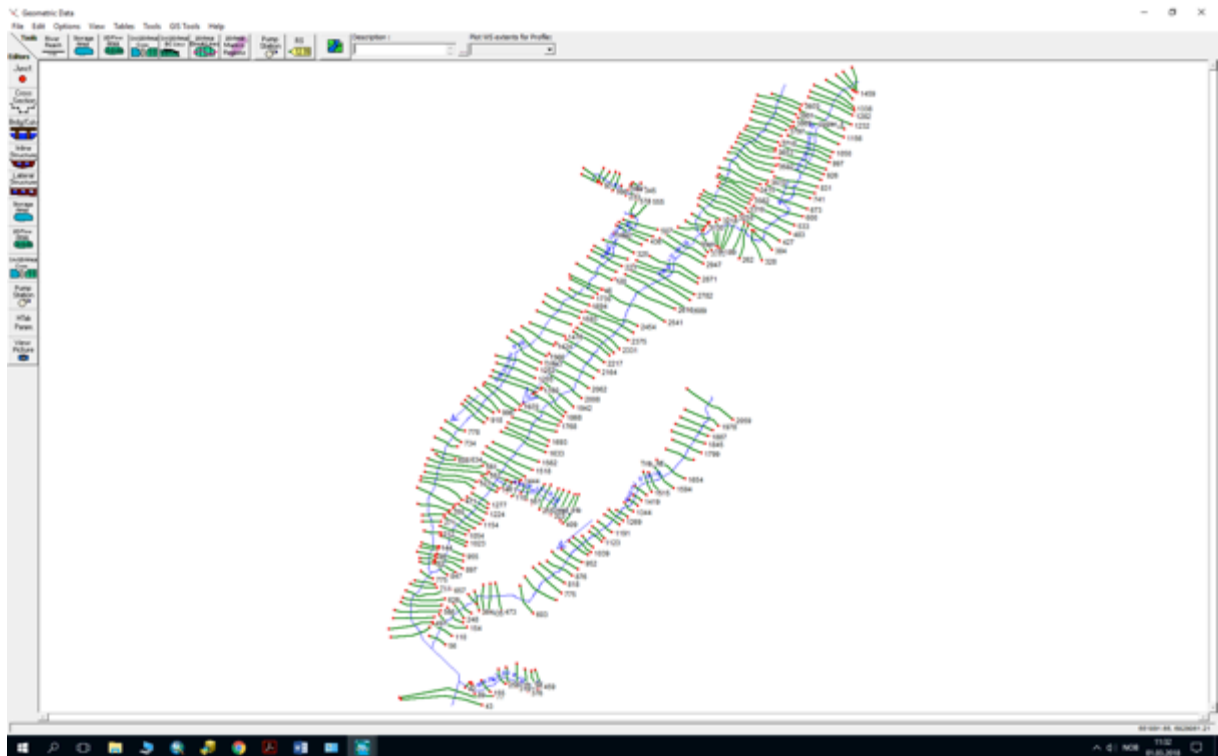


Figur 5-29: Masser avsatt oppstrøms av kulvert under nedbørshendelsen i Juli 2017.

5.5 Hindringer og avgjørelser i HEC-RAS

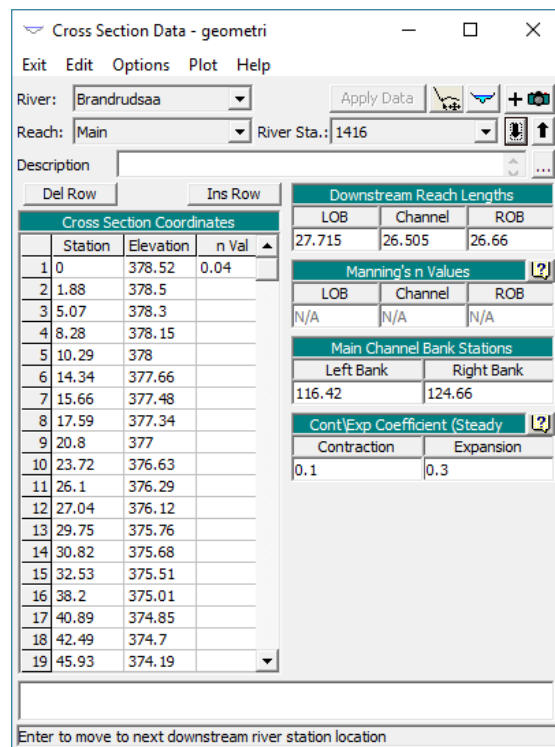
En kontinuerlig prosess i HEC-RAS var optimalisering av tverrsnittene, da disse er avgjørende for å oppnå gode resultater. Hvor lange eller hvilken avstand det skal være mellom tverrsnittene er det ingen fasit på. Derimot har vi funnet ut gjennom prosessen at de bør ha liten avstand, noe som resulterte i enklere konstruksjon av kulvertene. Under konstruksjon av kulvertene var det viktig at tverrsnittene var digitalisert så nærme veiskulderen som mulig. Digitaliseringen av elva har i stor grad foregått uten problemer, men det skal nevnes at det har vært nødvendig å flytte på elva noen steder der den ikke passet med terrengmodellen. Det er klart at en modell som inkluderte alle sideelvene ville ha ført til et optimalt resultat, med mer erfaring og tid tilgjengelig kunne dette blitt gjennomført. En av de største grunnene til at sideelvene ble utelatt fra analysen er at det oppsto problemer med kodingen til tverrsnittene. Resultatet av dette ble kun en analyse for hovedelva, Brandrudsåa.

Digitaliseringsprosessen har gjort det klart for oss at for å få en optimal hydrologisk analyse er det viktigste parameteret tverrsnittene. Om tverrsnittene ikke er tegnet optimalt, kan dette resultere i at vannet vil samle seg opp i lavereliggende områder som er lavere enn elvekanalen. Derfor gjorde vi en avgjørelse om å kutte tverrsnittene i disse tilfelle for å ”presse” vannet tilbake i elvekanalen. Resultatet av dette er at elva ikke har muligheten til å ”hoppe” over i en annen kanal, noe som illustreres av figur 5-3.



Figur 5-30: Opprinnelig ønsket nedbørsfelt.

Figur 5-30 viser hvordan elvesystemet ville ha sett ut om det hadde blitt kjørt en analyse med sideelver. Innad i nedbørsfeltet er det flere små sideelver, i tillegg til en liten innsjø oppstrøms i elva.



Figur 5-31: Editor for tverrsnitt.

Under "Cross-Section Coordinates" i figur 5-31 legges det inn elvestasjon og høyden den ligger på, samt Mannings n -verdi. Elvestasjon "0" har en høyde på 378,25 moh, mens Mannings n -verdien for denne lokaliteten er 0,04. Verdiene for "Left Bank" og "Right Bank" er henholdsvis 116,42 og 124,66.

Blokkerte hindringer ble digitalisert på bakgrunn av innhenting av SFKB-bygg fra Kartverket. Siden det kun ble simulert hydrologiske analyser for Brandrudsåa, ble det tatt en avgjørelse om å kun digitalisere bygningene som var i umiddelbar fare for å bli skadet under en flomhendelse. Noen av de utvalgte husene vises i figur 4-19. Det som er felles for de digitaliserte lagene er at dette er gjort gjennom "RAS-geometry" menyen.

I denne analysen er det flere parametere som ikke har blitt brukt, for eksempelvis; "Ineffective flow areas", "Levee Alignment" og "storage areas". Årsaken for at de to første er utelatt fra prosessen er at det er knyttet store usikkerheter til digitaliseringen av disse. Om disse hadde blitt digitalisert, er det usikkert hvilken feilkilde dette kunne ført til. Brandrudsåa har ingen demninger eller konstruksjonen som ville ha ført til en oppsamling eller senkning av vannhastighet, derfor er ikke "storage areas" digitalisert. I et videre arbeid kunne de to første ha blitt digitalisert. Brunner (2016) nevner at en begrensning i analyser med endimensjonal steady flow er blant annet at den tar utgangspunkt i en stabil strømning, men gradvis variert, bortsett fra områder rundt kulverten. Den endimensjonale vannstrømmen tar ikke hensyn til varierte strømninger innen en del av elva og der elva består av smale skråninger, her nevnes eksempel verdien 1:10 (5,71) grader. For å kunne ta hensyn til dette måtte elva ha blitt delt inn etter vanddybden ved bruk av cosinus.

6 Diskusjon

6.1 Terrengmodell

I en analyse er resultatene en konsekvens av kvaliteten til dataene innhentet og de metodiske valgene. I dette kapittelet blir datagrunnlaget, metodiske valg og analysene diskutert. I en hydrologisk analyse er et viktig fundament terrengmodellen. En dårlig terrengmodell med lav oppløsning vil føre til et dårlig resultat. Hengl (2006) skriver at det ikke finnes en eksakt fasit på hva en ideell cellestørrelse er, men at den avhenger av formålet til analysen og terrengformasjonene i den virkelige verden. I denne oppgaven er formelen til McCullagh (1998) brukt for å kalkulere cellestørrelse. Resultatet var at den optimale cellestørrelsen er på 1,3, derfor ble denne terrengmodellen konstruert med en cellestørrelse på 1x1 meter. Jeg anser dette å være godt innenfor den estimerte verdien, noe som også blir bekreftet gjennom Liu et al., (2007) Terrengparameterens resultater vil variere med oppløsningen til høydemodellen (Hengl & Evans 2009). Fisher & Tate (2006) mener at det ikke finnes noen fasit på hvilken interpolasjonsmetode som konstruerer den beste høydemodellen. I denne oppgaven har det blitt valgt Invers vektet distanse som interpolasjonsmetode. Siden det ikke er gjennomført en sammenligning mot andre interpolasjonsmetoder er det uklart om hvor nøyaktig terrengmodellen er, eller om den hadde blitt nøyaktigere ved bruk av andre interpolasjonsmetoder. Scanningen som høydemodellen er basert på er gjort i forkant av utbygging av nye E6 som går på tvers av feltområde, og påvirker resultatet negativt.

Da masterprosessen startet, var meningen å bruke ArcGIS gjennom hele oppgaven. I sammenheng med flomanalyse er ArcGIS godt egnet på grunn av relevante verktøy. Etter hvert som prosessen kom i gang ble det klart at det kunne bli problematisk å få vannet til å dreneres i begge rør. Den viktigste årsaken til dette var de to stikkrennene som går parallelt under nye E6. Første prosessering i ArcMap resulterte i at vannet kun fulgte det ene løpet. Etter dette ble forskjellige løsninger testet, uten at det førte til bedre resultater. Blant annet ble "flow direction" kjørt gjennom programtillegget "TauDem", her med samme resultat. Når de forskjellige løsningene ikke oppnådde ønsket resultat, ble det opplagt at det måtte benyttes en metode som aksepterer flere løp, og det ble derfor valgt å bruke HEC-RAS. Som nevnt tidligere kan ArcGIS blokkere totalt ut dreneringskanaler. HEC-RAS gir mulighet til å blokkere kulverter/stikkrenner i variert grad, noe som fører til flere muligheter for visualisering av effekten til blokkerte kulverter.

De fjerne feltparametre vil variere med oppløsningen til høydemodellen (Hengl & Evans, 2009). En optimal oppløsning er vanskelig å finne, årsaken er at terrengparameterne nødvendigvis ikke gir høyest korrelasjonskoeffisient på den samme oppløsningen (Hengl, 2006). I denne oppgaven er det synlig at det blir oppnådd forskjellig resultat ved bruk av TIN og GRID. Parameterne tar hensyn til alle aspekter nødvendig for en god analysebakgrunn. En hydrologisk modell gir kun et inntrykk av det fysiske feltet, siden en matematisk modell aldri vil gjengi systemet nøyaktig nok (Bales & Wagner, 2009). Kvaliteten på resultatet vil reflekteres av kvaliteten på dataene, samt prosessene i modellen. Grunnlaget for modellen og hvilke antakelser/avgjørelser som er tatt i forbindelse med dataene vil påvirke resultatet som blir oppnådd i analysen (Hunter et al., 2007). En 200-årsflom vil ikke oppføre seg likt i en modellering som i virkeligheten. Modellen vil gi feil i størrelse i mindre eller større grad og i ukjent retning.

6.2 Positive og negative aspekter ved TIN og grid

Det knyttes både positive og negative faktorer til bruk av TIN/GRID i en hydrologisk analyse. Det er gjort flere forsøk på å fastslå hvilken metode som fungerer mest optimalt. Blant annet var Mark (1975) en av de første til å sammenligne disse metodene. Der en av konklusjonene hans var knyttet opp mot hvilket ”minne” som trengs for å skape like gode overflateparametere. Videre skrives det at for konstruering av like gode estimater av en terrengoverflate krever GRID dobbelt minne av hva som er tilfelle for TIN (Hengl & Evans, 2009). Det analyserte området i denne oppgaven har en relativt lav utstrekning, derfor er det usikkert i hvilken grad minne blir påvirket gjennom bruk av TIN/GRID. Hadde området vært større kunne dette vært et element som måtte ha blitt tatt hensyn til. Men det som er klart er at forskjellene mellom TIN og GRID ikke er vesentlige i variert terreng, men i flatere områder er det tydelig at GRID danner mest rett flomsone. Av figur 4-8 er det tydelig at en TIN-DEM representasjon illustrerer kurvene på en bedre måte enn ved GRID-DEM, selv om disse skulle inneholde like mange romlige funksjoner (Hengl & Evans, 2009). I denne analysen er den største forskjellen mellom de ulike metodene i området rundt nye E6. Derfor stemmer det ikke det Hengl & Evans (2009) sier i det tilfelle her. I Ackerman (2012) skrives det at den hensiktsmessige metoden for overflatemodelleringer er TIN, dette er på grunn av dens evne til å representere; lineære egenskaper, elvebanker, veier og leveer. I en viss grad stemmer dette for denne analysen, men det bare for oppstrøms i elva, mens det for nedstrøms i elva, fører GRID til et bedre resultat.

For diskrete forandringer i topografien er det sagt at en mer presis representasjon kan oppnås ved bruk av TIN (Hengl & Evans, 2009), for glattere overflater vil dette være misledende. Der terrenget er varierende er det ikke store forandringer ved bruk av TIN/GRID, noe som illustreres av figur 5-21 og 5-25. I dette området har flomsonene en lav variasjon, og dette kan støttes av påstanden til Hengl & Evans (2009). Dersom det ses på forskjellene nedstrøms i elva har de to metodene medført en vesentlig forskjell som kan være en årsak av at terrenget flater ut. Det kan forklare at det i slakere terreng oppnås bedre resultat med GRID. Hadde vi gjort justeringer av harde (veier, elver, eller elvebanker) og myke (kontur) funksjoner kunne det ha blitt oppnådd et annet resultat.

For å ta hensyn til ruhetskoeffisienter er det for hvert tverrsnitt satt en Mannings n -verdi konfigurert ut i fra arealbrukskategori. Det er flere studier som diskuterer hvor stor forskjell det er fra lav til høy vannføring og hvilken effekt dette har på ruheten i kanalen. Blant andre tar både Pappenberger et al., (2005) og Hunter et al., (2007) opp dette. Disse studiene påviser at den effektive ruhetskoeffisienten kan forandres for ulike strømregimer. Det er ikke tatt høyde for hva minskning eller økning i ruhet kan ha slags innvirkning på resultatet i denne analysen. Det er derimot ikke noe i veien for at dette kan bli utført gjennom HEC-RAS. Men det skrives også i Hunter et al., (2007) at det er vanskelig å demonstrere slike fysiske egenskaper nøyaktig nok i en enkle modeller. I valg av ruhetskoeffisient har vi stolt på at Chow, 1959) sine koeffisienter (se vedlegg i kapittel 10.13). En analyse med en høy ruhetskoeffisient vil muligens gi et annet resultat enn hva som hadde vært tilfellet for en analyse med lav ruhetskoeffisient. Om det går fra lav til høy ruhet kan det godt hende at det Hunter (2007) sier om at ruheten forandres av ulike strømregimer. En lav vannføring vil ha en annen kanalruhet enn det som er tilfelle med en høy vannføring.

6.3 utfordringer ved digitalisering

Det har i løpet av digitaliseringen vært flere uklarheter rundt prosessen, i tillegg til manglende kunnskaper fra vår side. Siden det er få beskrivelser av hvordan digitaliseringen skal foregå i manualene, har dette medført flere uklarheter, noe som medfører prøving og feiling i et forsøk på å oppnå et korrekt resultat. Med klarere retningslinjer ville digitaliseringen ha foregått raskere og enklere. Siden digitaliseringen har tatt lenger tid enn ønsket, har det ikke vært tid til å foreta en sammenligning opp mot andre metoder. Brunner (2016) skriver at ved en viss bratthet bør elva deles inn i seksjoner etter vanndybde. Dette kan indikere at programmet ikke

er optimalisert for en bratt fjellelv som Brandrudsåa. Det er uklart for oss hva en inndeling i seksjoner hadde gitt av resultater.

Digitaliseringen av tverrsnitt har vært en prosess som gjennom oppgaven har krevd opptil flere endringer. Disse endringene gjelder blant annet lengden og avstanden mellom dem. I den første analysen medførte dette en vannutbredelse som ikke var optimal. Derfor ble disse kuttet ned i visse områder, som vist av figur 5-9. Resultatet ble en mer komprimert utbredelse av vann, i tillegg holdt vannet seg i den ønskede elvekanalen. Det kan diskuteres hvor optimalt dette er, for i en flomsituasjon vil det ofte være tilfeller av at vannet beveger seg over til andre kanaler. I denne analysen var vi mer ute etter kapasiteten til Brandrudsåa, derfor ble denne avgjørelsen tatt. Tverrsnittene var ved første digitalisering ikke plassert nærme nok stedet der det skulle konstrueres kulverter. På bakgrunn av dette ble det lagt inn tverrsnitt ved samtlige vegskuldre der kulverten passerte.

Digitaliseringen av ulike parametere har ført med seg flere usikre elementer. En egenskap som skal fastsettes ved konstruksjon av kulverter er hvilken avstand det er fra inngang kulvert til vegskulder. Ved å ikke være fysisk ute i felt har resultatet blitt at denne distansen er målt gjennom verktøyet "distance" i ArcMap. En annen egenskap som det er knyttet stor usikkerhet til er "helningen" til kulverten, en løsning her var å benytte høydeverdien til tverrsnittene oppstrøms og nedstrøms av kulvert. Hvilken helning kulverten har vil virke inn på vannets hastighet gjennom kulverten, i tillegg kan elementet av selvrensing knyttes opp mot helningen. Kulvertens mulighet til selvrensing vil avgjøre om kulverten fylles igjen av sedimenter eller ikke. Kulvertenes Mannings n -verdi er basert på verdiene til Chow (Brunner, 2016), vi har valgt å stole på disse verdiene, selv om det kan knyttes usikkerheter til disse. For et fåtall av kulvertene har det vært usikkerheter rundt hvilket materiale dem er konstruert av, og dette kan medføre en viss usikkerhet.

6.4 Feilkilder og mangler i prosessen

Bruken av Nevina har medført usikkerhetsmomenter som er verdt å nevne. For den gamle versjonen av Nevina beskriver Fergus et al., (2011) en feilmargin på opptil 20 %. Det er uklart om denne feilmarginen er like stor eller mindre for den nye versjonen. Derfor bør det regnes med en liten feilmargin i bruken av Nevina. Blant annet er det gjennom denne oppgaven oppdaget at plassering av genereringspunktet for nedbørsfelt er avgjørende for oppnådd resultat. Om dette punktet plasseres feil som er illustrert av figur 5-2, viser dette et større

kalkulert området enn ønsket. Hvilke usikkerheter kalkuleringene til Nevina bringer med seg er ikke fastslått, men i Engeland (2012) nevnes at det i 40 % av tilfellene vil det være en feilmargin. Verdiene som er hentet ut er basert på dataserier fra perioden 1960-2000, der det kreves en serie på minimum 15 år. For å få ned feilmarginen kan det gjøres uavhengige kalkuleringer ved bruk av formlene. I tillegg henvises det til at en selv må anta rimeligheten til dataene innhentet. I sammenheng med oppgaven er ikke Nevina ofte brukt, noe som kan gjøre det vanskeligere å kvantifisere usikkerhetene.

Ved å benytte en lite anvendt metode, vil det medføre forskjellige faktorer. Å ikke kunne hente inn kunnskap fra andre relaterte arbeider, medfører en usikkerhet knyttet til oppnådd resultat. Selv om Nevina ofte er brukt i kalkuleringer i forbindelse med kraftutbygging, er den bare benyttet på et lavt nivå, og aller helst for å gjøre en enkelt overslag (Stenius & Glad, 2015). Det finnes få verktøy/metoder for beregning av parametere i umålte felt, og i slike tilfeller kan Nevina være en løsning. Verdiene som er hentet ut ifra Nevina har ikke blitt satt opp mot andre metoder for innhenting av data for vannføring. Men dette kunne blitt løst om det hadde blitt hentet inn data fra MET, der dette kunne gitt et sammenligningsgrunnlag for dataene hentet ut fra Nevina. Årsaken til dette er at MET sine data er hentet ut gjennom både observasjoner og målestasjoner, og dermed kan dette gi et større sammenligningsgrunnlag. Selv om det i Nevina (2015) blir gitt uttrykk for at verdiene som blir innhentet gir et godt resultat.

Bruken av HEC-RAS kan potensielt tilføre flere feilkilder, enn hva som er tilfelle ved bruk av Nevina. Her kan for eksempelvis tverrsnitt, bankpoints og konstruksjon av kulverter nevnes. Feilkildene i HEC-RAS er forbundet med at samtlige lag må digitaliseres for hånd, i tillegg er det få retningslinjer tilgjengelig. Ved digitalisering av tverrsnitt er det flere valg som må tas med hensyn til lengde og avstand. Kvaliteten til tverrsnittene vil være med å avgjøre hvordan komprimeringen/utbredelsen til flomsone utarter seg. Kortere tverrsnitt vil ha en mer komprimert flomsone enn om tverrsnittene er lengre. Derfor vil disse valgene påvirke hvilket resultat som blir oppnådd.

På venstre side av kartene som viser flomsone ved E6, er det en utbredelse med rette kanter. Årsaken til dette er vist i figur 5-18 hvor det illustreres at de rette kantene er forårsaket av hvordan tverrsnittene er digitalisert. Ut i fra grensepolygonet skulle det kunne antas at flomsone skulle hatt en lik utbredelse for begge sider, dette er ikke tilfelle. Men på høyre

side har flomsonen fått en mer usymmetrisk utbredelse. En mulig forklaring kan være at terrenget i dette området har en helning mot venstre som fører til en vannoppsamling på venstre side. Dette kan også være et resultat av at det ikke er nok vann simulert til å danne en symmetrisk flomsone.

Skanningen som er bakgrunnen for den hydrologiske høydemodellen har en punkttetthet på 1 meter. Som interpoleringsmetode for høydemodellen har det blitt brukt naturlig nabo med invers avstands vekting (IDW). Fisher & Tate (2006) har i sin artikkel kommet fram til at det ikke er noen fasit for hvilken interpolasjonsmetode som gir det beste resultatet.

Interpolasjonsmetoden i bruk påvirkes av den naturlige overflaten til terrenget, enten det er et komplekst eller enkelt terreng. Nøyaktigheten og fordelingen av punkter som er brukt til å interpolere modellen er også med på å bestemme hvilke metode som gir en god høydemodell i analysen. Ved flere returpunkter fra vegetasjonen vil dette medføre større avstand mellom bakkepunktene, som kan føre til en mindre detaljert høydemodell. Om dette er tilfelle kan det være hensiktsmessig for resultatet å benytte seg av vei-data for å få modellert grøftene med et bedre resultat i områder med tett vegetasjon (Bater & Coops, 2009). I tilfeller ved eldre skanninger kan det oppleves at grøftene var tett vegeterte, mens det i dag er renskede grøfter, hvor det i tilfeller kan føre til et annet resultat. Siden det ikke er utført sammenligninger av hva slags type interpoleringsmetode som gir best terrengmodell, er det vanskelig å si om terrengmodellen i denne analysen er god eller dårlig.

Digitaliseringsprosessen rundt HEC-RAS har til tider vært vanskelig og tidkrevende, noe som har resultert i manglende konstruksjon av ulike parametere, og derfor vil disse bli diskutert kort. Tidligere har det blitt nevnt at scanningen som terrengmodellen er basert på, fant sted før den nye E6 ble utbygd, og derfor er ikke den med i terrengmodellen. Med tanke på oppnådd resultat fører dette med seg en negativ innvirkning. I tillegg til at E6 ikke er med i terrengmodellen, er heller ikke veiene i området hevet, noe som er vanlig prosess i en hydrologisk analyse. Veiene er i all hovedsak ikke hevet på grunn av tidsmangel i prosessen. En egenskap som skal fastsettes i konstruksjonen av kulverter er avstanden mellom veiflaten og ned til toppen av kulverten. I mangel av hevede veier kan dette elementet være med på å kompensere for oppnådd resultatet. Ønsket var ved starten av analysene at det skulle kjøres både en analyse med ”steady flow” og ”unsteady flow”. I mangel på tid er det kun førstnevnte simulert. Om ”unsteady flow” hadde blitt simulert, ville det i dette tilfelle vært behov for å bruke PQRUT.

I flomveisanalyse i antropogene områder er det nødvendig å ta noen nødvendige betraktninger. Dette kan omhandle heving av bygninger slik at vannet renner rundt bygningen og ikke gjennom. Her er dette løst ved bruk av blokkerte hindringer. Hevingen av bygninger ble i denne oppgaven gjort gjennom egenskapstabellen til tverrsnitt i steg 16 i tabell 4-1. Det ble valgt å heve bygningene med fem meter, siden det i denne analysen ikke ville oppstå tilfeller med en vanddybde på mer enn fem meter.

For å få en helhetlig vurdering av dreneringsveier er det nødvendig å avdekke og forebygge store vannrelaterte skader. I denne oppgaven er det knyttet stor usikkerhet til den manglende stadfestingen av private stikkrenner på eiendommer og veier. På grunn av de store jordbruksområder rundt Brandrudsåa, der disse kan ha ulike dreneringskanaler som er koblet opp mot elva og dermed føre til en større vannføring inn til elva enn hva som er beregnet. Der det er åpne grøfter kan dette bli visualisert gjennom ulike kartløsninger og dermed bli tatt med i beregningene. En kartlegging av samtlige dreneringskanaler i området er en prosess som er svært tidkrevende og som det dessverre ikke er tid til i en masteroppgave. Vi har i denne analysen tatt med kulvertene som følger hovedløpet til Brandrudsåa.

Hennig (2015) har i sin masteroppgave kjørt flomanalyser for Brandrudsåa, men derimot med hjelp av D-infinity og D8 som metode. Her har det blitt funnet et sårbart område for det samme område som vist i figur 5-21. Sellevold & Edvardsen (2013) har i sin rapport kommet med en påstand om at ved redusert vannmengde vil dette bidra til høyere potensiale for avsetning av sedimenter og økt fare for tette stikkrenner. En slik påstand kan forsvares gjennom figur 5-25 hvor kulvertene er blokkert. Nedstrøms av dette område er det store jordbruksarealer, som kan føre til økt overflateavrenning. Selv om dette området i figur 5-25 er langt oppstrøms i feltet er det nødvendig å planlegge for store dreneringsmengder ved styrtregn.

6.5 Usikkerheter ved kartlegging av flomutbredelse

Kartlegginger av flomsoneer knyttes til store usikkerheter, noe som blir utredet både Bales & Wagner (2009) & Merwade et al., (2008). Meningen bak et flomsonekart er å representere grensene til utbredelsen, men det er knyttet store usikkerheter til polygonene som representerer dette, men noe som ofte er uspesifisert. En god kartlegging av flomsoneer omhandler fire faktorer; en nøyaktig høydemodell, grenser for kartlegging oppstrøms og nedstrøms,

ruhetskoeffisienter og data for validering av modellen. De tre første faktorene som nevnes er en av del av analysen i denne oppgaven. Faktoren som handler om data for validering av modellen er i dette tilfelle i liten grad tilstedeværende. Det kan derimot gjennom sammenligningen med hendelsen juli 2017, påstås at denne kan fungere som en validering. Det er gjort få flomsonekartlegginger av Brandrudsåa, men det er gjort opptil flere flomveisanalyser (Hennig, 2015; Olsen, 2013).

I analysen til Bales & Wagner (2009) tas det utgangspunkt i at et flomsonekart er beregnet gjennom steady-flow modellering, og som baseres på antagelsen om at vannstrømmen har holdt seg stabil over en lengre tidsperiode. På denne måten gis vannet muligheten til å utbrede seg. Det fokuseres på at en flom på et gitt sted vil øke mot dens topp, før den trekker seg tilbake. I de fleste tilfeller vil dette resultere i mer utbredelse med en flom med samme toppunkt, men som øker sakte, og har rask tilbakegang. I denne analysen er det tenkt en flom som har en sakte økning mot toppunktet, før den returnerer. Om dette er tilfelle vil det kunne forklare de små oppsamlingene av vann som ligger utenfor selve flomsone. Bales & Wagner (2009) forklarer her at de små dammene har oppstått gjennom en flom som både har rask flomtopp, men også en rask tilbaketrekkes. Derfor kan de små dammene som har oppstått utenfor selve flomsone i denne analysen være skapt av både en sakte og hurtig flomtopp og tilbaketrekking. Dette er noe som gjennom en analyse med ”unsteady flow” kunne blitt undersøkt nærmere.

6.6 Sammenligning av åpne og blokkerte kulverter

Ved å studere forskjellene mellom åpne og blokkerte kulverter kan dette være med å forklare hvilke forskjeller som oppstår i feltet. Derfor vil det i dette kapittelet bli diskutert hva som er de tre største forskjellene mellom figur 5-21 og 5-25. Første forskjellen handler om den store ansamlingen av vann som oppstår nedstrøms av kulvert ved Kvarvvegen 238, hvor den har økt betraktelig i volum og utbredelse i forhold til hva som er tilfelle med åpne kulverter (figur 5-21). Forskjell nummer to indikerer hvordan flomsone rundt det øverste huset vil skades gjennom blokkerte kulverter, her har det blitt en oppsamling av vann ved baksiden av huset, flomsone har i tillegg økt rundt huset. Forskjell nummer tre handler om hvordan flomsone rundt huset nederst i kartet har økt. Ved åpne kulverter har vannet samlet seg i en usammenhengende sone, mens ved blokkerte kulverter har denne sone blitt sammenhengende. Den økte flomsone nedstrøms av den øverste kulverten kan være dannet

på grunn av at det rundt denne kulverten er et flatere område som vil føre til en oppsamling av vann.

6.7 Overflateavrenning og infiltrasjonsevne i Brandrudsåa

Om jorda er mettet eller umettet vil ha en sterk innvirkning på hvordan en nedbørshendelse vil utarte seg og hvor små/store konsekvensene vil bli. En større nedbørshendelse etter en periode med en høy nedbørsrate vil føre til en sterkere grad av overflateavrenning. Denne vil bli påvirket av metningsgraden av jordprofilet opp til overflaten (Pearce, 1975). Arealer som genererer overflateavrenning kan oppføre seg svært dynamisk (Beven & Wood, 1982). Ved å ta denne påstanden inn i hvordan analysen til Brandrudsåa har oppført seg, kan det muligens konkluderes med at det er en dynamisk overflateavrenning i området. Gjennom figur 3-10 i kapittel 3.6 er det beskrevet hva slags infiltrasjonsevne de ulike løsmassene har. Brandrudsåa renner i et område som består av en stor andel tykk og tynn morene, i tillegg til små områder bestående av bart fjell og bresjø-/innsjøavsetning. Ved å ta i betraktning infiltrasjonsevnene til disse, ser en at det er tykk morene som har den høyeste infiltrasjonsevnen, mens det vil være et lavere infiltrasjonsevne i et tynt morenedekke.

Ved tidligere hendelser med ekstremnedbør har området vært sterkt utsatt for overflateavrenning. Flomhendelsen i 2011 ble forårsaket av tele i bakken som hindret infiltrasjon, der dette støttes av Ollesch et al., (2005) som forklarer at tele fører til sterk overflateavrenning. En av konklusjonene i rapporten (klima i Norge i 2100) er en nedbørsøkning på 20 %, i tillegg til økt nedbørsintensitet. For bratte fjellelver kan dette resultere i forsterket normal middelvannføring. En økt middelvannføring vil i tillegg til økt frekvens og mengde nedbør føre til større konsekvenser gjennom flomhendelser i framtiden enn hva tilfelle er for dagens klima (Hanssen et al., 2015). Jordas fuktighet før en nedbørshendelse vil være med å bestemme hvilken flomrate som vil oppleves.

Avrenningsprosessene i et system vil påvirkes av jordas fuktighet (Tarbaton, 2003). Om klimaframskrivingene til Hanssen et al., (2015) stemmer vil dette resultere i flere hendelser hvor punktet for drenering passerer og derved få mer overflateavrenning som kan føre til flere flomrelaterte skader. Under hendelsen i juli 2017 ble området påført store skader gjennom vann på avveie og tette dreneringskanaler. Jensen og Tesaker (2009) henviser til at elver i små nedbørsfelt kan steinlegges, der dette ses på som et effektivt tiltak i særlig bratte bekke- og elveløp. Det er ved slike tiltak viktig at sikringene er dimensjoner korrekt for å unngå skader på infrastruktur og bygninger. Men det er gjennom denne oppgaven og forutgående feltkurs

opplevd at sikringstiltakene som er gjennomført nedstrøms i elva ikke er tilfredsstillende. Dette er noe som kan ses av figur 5-27, hvor det er tydelige skader på den steinlagte elvekanten. Det vil i framtiden være viktig med gode kartlegginger og en lokal kompetanse om klimatilpasset byggevirkosomhet. Dette vil føre en økt etterspørsel etter gode løsninger for arealplanlegging (Regjeringen, 2008). Gode løsninger for arealplanlegginger er noe som kommer til å være spesielt viktig i norske dalstrøk, siden mange av bebyggelsene er lokalisert på skred- og elvevifter. Dalstrøkene består ofte av små og bratte elver med smale kanaler som med økt gjennomsnittlig vannføring kan bli til store masseførende sidevassdrag i framtiden (Met, 2016; Hanssen et al., 2015).

Med kunnskaper om et forandret nedbørsmønster i fremtiden kan det argumenteres for at en vil oppleve flere nedbørshendelser på mettet overflate. Et forandret nedbørsmønster er også noe som tas opp i Hanssen et al., (2015), i tillegg til hvordan en 200-årsflom vil forandre seg fram mot 2100. Av figur 3-11 vises det at spesielt Vestlandet og Nordland vil oppleve flere dager med økt nedbør (Ibid). Om dette blir tilfelle vil en i følge Selby (2005) få en mettet avrenning som foregår ved mettede porer. En slik drenering er normalt i de nederste nivåene av lavt drenerte jordtyper, og i godt drenerte jordtyper over lagdelt leire. Dette vil også foregå i øvre deler av de fleste jordarter eller umiddelbart etter heftig regn (Ibid). Bryan (2000) skriver følgende ved intense og langvarige nedbørshendelser vil disse påvirke og øke dybden til overflateavrenninger. Et resultat av dette vil føre til en endring fra høy ruhet, der det er mange hydrauliske elementer som forstyrrer i form av små stein osv. til en lav ruhet som fører til erosjon og massetransport. Med en endring i ruhet kan en konsekvens være at det blir et økt skadepotensial, der flomhendelser vil i større grad påføre elveløpet høy skjørspenning og hvor dette kan føre til økt erosjon og mulige omforminger av elveløp, noe som støttes av Tesaker et al., (2010).

En god håndtering av vann på avveie krever en fundamental kunnskap om prosessene som oppleves i et nedbørsfelt. Ved å inneha kunnskaper om prosessene som pågår mellom morfologien og prosessene i fjellelver, vil det gi et klarere utgangspunkt for hvordan disse vil reagere på naturlige og menneskelige forstyrrelser (Montgomery & Buffington, 1997). I et framtidsklima vil det være viktig å ha en kunnskap om styrtflommer og dens konsekvenser. Det er i norsk sammenheng ikke avklart en definisjon for hva en styrtflom er, men Waagø (2012) har utarbeidet følgende definisjon *”Styrtflom dreier seg om flom i mindre, ofte bratte nedbørsfelt med liten fordrøyningskapasitet i feltet”* (NVE, 2012). Ulike scenarioer som

foreligger for framtidens klima tilsier en økt hyppighet av styrtregn (Huntington, 2006). Kan det for denne oppgaven derfor være mulig å si at en flomhendelse i et bratt elveløp som Brandrudsåa kan oppføre seg som en styrtflom? For å kunne få en bedre forståelse av interaksjonen mellom nedbørsintensitet og hydrologiske forhold kan være med på å øke eller minske flomfaren i et giss vassdrag er det nødvendig med en bedre forståelse. En økt forståelse av dette kan oppnås gjennom et større fokus på antropogene inngrep i en elv og hvordan disse påvirker flomfaren (Vatne, 2013).

Det er i kapittel 3.5 skrevet om ulike typer overflateavrenning, der den ene er mettet overflateavrenning og nummer to er Hortonian overflateavrenning som begge blir videre tatt opp i dette kapitlet. Ved mettet jord vil det oppstå overflateavrenning, og Pearce (1975) beskriver to grunnelementer for at Hortonian overflateavrenning skal skje; nummer en at den er produsert gjennom tilgang på nedbør og at det er en overskridelse av infiltrasjonskapasiteten. Nummer to beskrives ved; for små nedbørsfelt vil ikke nedbørintensiteten eller infiltrasjonen variere stort, og derfor vil Hortonian avrenning fordele seg likt over hele nedbørsfeltet (Ibid). Et område med ulike vegetasjonsdekker og ulik grad av bebyggelse vil ha en ulik grad av avrenning. Om vannet avrenner på asfalt vil denne ha en annen type avrenning enn hva som er tilfelle for skogsområder, noe som blir bekreftet av tabell 4-5, der det er en vesentlig forskjell i ruhetskoeffisienten. Derfor er det mer sannsynlig med en mettet overflateavrenning som Pearce (1975) forklarer skjer ved en lokal midlertidig metning av jordprofilen opp til bakken. I tillegg tar mettet overflateavrenning hensyn til faktorer som vegetasjon, jordoverflate og mikrotopografi som er med og påvirker overflateavrenningen. I denne sammenhengen er det derfor mer sannsynlig at Brandrudsåa vil oppleve en mettet overflateavrenning og ikke en Hortonian overflateavrenning. Dette er på grunnlag av at ulike faktorer vil føre til forskjellig avrenning avhengig av hvor i nedbørsfeltet den foregår.

Siden det ikke er undersøkt noe om hvordan massene i område drenerer er en i denne analysen nødt til å benytte seg andre sine funn. Brandrudsåa ligger i hovedsak i et område med godt drenerte jordmasser. I stor grad omkranses Brandrudsåa av varierende tykkelser av morene. Lindholm et al., (1999) opererer med tre ulike permeabilitetsklasser, ved denne klassifiseringen er Brandrudsåa i klasse to, som beskriver områder med relativt lavpermeable jordmasser har en permeabilitetsindeks på to meter per døgn. Indeksen er tatt ut fra sandig og grusig morene, samt breelv- og elveavsetninger med lav vannledningsevne. Med

utgangspunkt i NGU sin indeks for dreneringsevne har denne et samsvar med permeabilitetsklasse til Lindholm et al., (1999). Egenskapen ”landuse” i HEC-RAS tar med de ulike arealkategoriene inn i analysen. Hvor avgjørende denne egenskapen er for de resulterende flomsonene er ikke klart, men det faktum at analysen har en egenskap som tar hensyn til arealbrukskategori vil være positivt for en hydrologisk analyse. Hovedårsaken for dette er at ulike vegetasjonsdekker og arealbrukskategorier vil ha ulike grader av drenering.

6.8 Potensialet til HEC-RAS og Nevina

Siden Brandrudsåa ikke har gode nedbørsdata tilgjengelig er en derfor avhengig av å innhente gjennom andre verktøy. For å hente inn nedbørdata til analysen, ble det i denne oppgaven benyttet Nevina. Årsaken er at Nevina kan hente inn feltparametere for umålte felt. Selv om det er usikkerheter bak verdiene innhentet, er disse i mangel på andre metoder blitt benyttet. Siden det kalkulererte nedbørsfeltet for denne analysen er 3,3 km², er det innenfor grensene som nevnes i Stenius & Glad (2015). I forbindelse med bruk av verdiene bør brukeren selv vurdere i hvilken grad de er nøyaktige nok for den videre bruken (Engeland (2012) For små, umålte nedbørsfelt kan det konkluderes med at potensiale til Nevina er tilstede. I fremtiden vil det være et større behov for flomsoneanalyser av små, umålte felt. Dette behovet skyldes en mulig fremtid med flere heftige nedbørshendelser, under slike hendelser er det små og bratte vassdrag som forårsaker størst skade (Hanssen et al., 2015; Vatne 2013). For å oppnå kunnskap om prosessene som foregår i disse elvene er det nødvendig å gjøre flomanalyser, og det er her Nevina kan fungere som et tilleggsverktøy.

Etter som prosessen har skridt frem er det blitt klarere at HEC-RAS har et betydelig potensiale innen hydrologiske analyser, og en viktig årsak til dette er valgmulighetene til å selv bestemme hvilke parametere som analysen skal baseres på. Derimot, er det i denne analysen brukt relativt få parametere. Det er en todelt årsak bak dette; analysen som skulle utføres i denne oppgaven hadde ikke behov for flere elementer, den andre handler om tidsmangel og bestemmelsen om at vi kunne få et godt resultat med de elementene vi har. Muligheten til å velge ulike gjentakintervaller, gjorde at HEC-RAS var hensiktsmessig med tanke hva som var ønsket bak analysen. HEC-RAS sin mulighet til å simulere ulike analyser som ”Steady flow” og ”unsteady flow” fører til en større dekningsgrad i tilfeller av kartlegginger av flomsone enn for eksempelvis ArcGIS. Resultatmessig ble det i denne oppgaven kun kjørt en ”steady-flow” analyse. Det er kombinasjonen av ulike

parametere/analyser og valgfriheten til disse som fører til at hver analyse kan bli optimalisert for det brukeren har som mål. I Brunner (2016) skrives det at om elva passerer en viss gradient, bør den inndeles i seksjoner som tar bakgrunn i vanndybden. Derfor kan en stille spørsmål om HEC-RAS er et optimalt program for bratte fjellelver, slik som Brandrudsåa. At flere parametere er valgfrie, fører til at brukeren selv må ta stilling til hvilke parametere som er nødvendige for hver enkelt analyse. Tidligere i oppgaven har det blitt nevnt at digitaliseringsprosessen har resultert i at noen av de ønskede analysene ikke har blitt gjennomført. Det er viktig når det skrives om potensiale til HEC-RAS at mangelen på tid ikke har årsak i programmet, men i mangelfull kunnskap fra vår side.

I resultatdelen av oppgaven har det blitt skrevet om hvilke effekter korte/lengre tverrsnitt fører til i sammenheng med flomsonene. Det er grensepolygonet som avgjør dette på bakgrunn av lengdene til tverrsnittene. Derfor reflekteres dette på flomsonene. Kortere tverrsnitt har medført en mer komprimert flomsone rundt elvekanalen. Avgjørelsen om å korte ned tverrsnittene i utvalgte områder var på grunnlag av at vannet skulle gå i hovedkanalen. En medvirkende årsak var også få en bedre simuleringen av kapasiteten til elva. Resultatet ble med lengre tverrsnitt en vannutbredelse som hadde en større utbredelse, og med flere steder hvor vannet hadde rent ned i områder som er dypere enn hva hovedkanalen er. Hva som gir best resultat av korte eller lengre tverrsnitt er ikke blitt utredet i denne oppgaven. Kortere tverrsnitt kan i større grad reflektere kapasiteten til elva, siden vannet har et mindre område for utbredelse. Derimot er det ved flomhendelser flere hendelser der vannet strømmer til andre lavereliggende områder, og med hensyn til dette kan det tenkes at det er lengre tverrsnitt som skaper et mest korrekt resultat. Som en mulig konklusjon på dette vil lengden på tverrsnittene reflektere det resultatet som er ønsket oppnådd. Tatt i betraktning det som har blitt diskutert i dette avsnittet kan det konkluderes med at HEC-RAS bør benyttes mer i flomanalyser.

Det er positivt for en analyse dersom resultatet kan bli sammenlignet opp mot en virkelig hendelse. I kapittel 5.4.3.1 er det gjort en sammenligning mot hendelsen i juli 2017. Sammenligningen som blir utført i dette kapittelet vil basere seg på resultatene i figur 5-24 og 5-26, der flomsonene oppnådd gjennom denne analysen blir vist. Vannmassene som sto over Eksisvegen i juli 2017, vises i figur 5-24. Figur 5-26 visualiserer effekten av blokkerte kulverter i den her oppgaven. Ut i fra disse figurene kan flere likhetstrekk ses, derfor kan det ut ifra dette antas at analysen som er gjennomført i denne oppgaven kan knyttes opp mot en

virkelig hendelse. Derimot er det viktig å ikke dra noen forhastede konklusjoner på grunn av at en hydrologisk modellering består av mange forenklinger av virkeligheten. Men resultatet kan brukes som en antagelse for hva en virkelig hendelse kan medføre. Gjennom data som viser vannføring og angir metningsgraden i forkant av hendelsen, kan fungere som et større grunnlag for en sterkere konklusjon. Det kan ved bruk av xgeo. hentes ut data for metningsgrad, der dette kan danne et grunnlag for antagelse.

Årsaken bak den store ansamlingen av vann under hendelsen i juli 2017, skyldtes blokkerte kulverter. Selv om kulvertene under nye E6 skal være dimensjonert for en 200-årsflom (Sør-Fron, 2017). At begge løpene i kulverten ble tette gjennom masseavsetning, forklarer de store massene som var i bevegelse under denne hendelsen. Siden det under hendelsen var blokkerte kulverter kan dette danne et større sammenligningsgrunnlag mot den analysen som er gjort i oppgaven. Hvilken betydning tverrsnittene har hatt for vannets utbredelse i figur-5-26 er uklar. Gjennom en sammenligning med figur 5-24 ser det ut som at de to vannutbredelse samsvarer godt. Men det er også viktig å påpeke at vannutbredelsen er større i 5-24, noe som kan være forårsaket av en overdrivelse i analysen gjort i HEC-RAS. På grunnlag av dette bør en være forsiktig med å dra konklusjoner av de resultatene som har blitt oppnådd i disse analysene. Men ved å gjøre en sammenligning kan dette være med på å danne et grunnlag for antagelser om hva som kan skje under flomhendelser i Brandrudsåa. Flomanalysene som er gjort i denne oppgaven kan kun fungere som et hjelpemiddel i flomsonekartlegginger og derfor kan ikke disse brukes som noe annet enn en antagelser. Dette er på grunn av at det kan stilles spørsmålsteget ved tverrsnittene og dens rolle i flomutbredelsen.

7 Konklusjon

Motivasjonen bak denne masteroppgaven var å undersøke om programmene Nevina og HEC-RAS kunne føre til en bedre og enklere løsning i forbindelse med flommodellering. For å verifisere analysen ble det gjort sammenligninger opp mot en nedbørshendelsen i juli 2017. Denne sammenligningen har vist at analysen og nedbørshendelsen har et samsvar, selv om analysen i noen tilfeller har overdrevet flomutbredelsen. Nevina benytter den rasjonale formel for sine beregninger, hvor denne metoden har en del usikkerheter knyttet til seg, og det er uklart i hvilken grad disse har påvirket analysen. Sett bort fra dette har verdiene hentet ut fra Nevina dannet grunnlaget for analysen i HEC-RAS. Det har gjennom prosessen vist seg at parameterne som brukes i HEC-RAS er sentrale for hvor resultatet blir. Konstruksjonen av disse har tatt lang tid og medfører en prøv og feil tilnærming. En av grunnene til dette er en manglende grunnleggende kompetanse om programmet. Mangelen på kompetanse har i tillegg blitt forsterket av mangel på retningslinjer for hvordan digitaliseringen skulle foregå. Ved mer feltarbeid og innhenting av data kunne denne prosessen gått enklere.

HEC-RAS har vist seg å være et program som kan ha et stort potensial i flomanalyser. Siden små justeringer, spesielt av tverrsnitt, fører til andre resultater, er det derfor vanskelig å konkludere med hvor gode resultatene er. Som tilleggsverktøy har Nevina gjort det mulig å simulere en analyse i HEC-RAS og det var derfor Nevina ble benyttet. For umålte felt gjør Nevina det mulig å gjennomføre en analyse der en går fra vannføring til vannstand/vannlinje. Derfor kan det gjennom denne oppgaven konkluderes med at det er et grunnlag for å bruke HEC-RAS og Nevina i videre flomanalyser.

8 Videre arbeid

Som en videreføring av denne oppgaven er det flere elementer som må tilføres eller bearbeides mer. Det er nødvendig å gjøre terrengmodellen mer nøyaktig, der dette innebærer blant annet å heise veiene, og en sammenligning med andre interpolasjonsmetoder. Er det mulig å gjøre innhenting av data mer nøyaktig. Der det kan gjøres store forbedringer ved mer feltarbeid. Når det kommer til den hydrologiske analysen er det i denne masteroppgaven kun kjørt en ”steadyflow analyse” der Nevina har blitt brukt som bakgrunnsdata for vannføring (m^3/s). I et videre arbeid er det ønske om å gjøre den samme analysen gjennom ”unsteady flow”, men med PQRUT som tilleggsprogram. I et videre arbeid er det ønskelig at

med en utvidelse av den eksisterende analysen med flere analyser for å oppnå et mer komplett og bedre analyse. Parameterne som HEC-RAS baseres på kan justeres mer for å få et mer nøyaktig resultat. Det er en god del å gå på når det gjelder de ruhetsverdiene som har blitt brukt i denne analysen og som gjennom feltarbeid kan gjøres nøyaktigere.

9 Referanseliste

- Ackerman, C. (2012). *HEC-GeoRAS - GIS Tools for Support of HEC-RAS using ArcGIS 10 User's Manual Version 10*. Hentet fra Davis:
- ArcGIS. (2016). *How Natural Neighbor works*. Hentet 21.04, 2018, fra <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-natural-neighbor-works.htm>
- ArcGIS. (2018). *Clip*. Hentet 12.01, 2018, fra <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/data-management/clip.htm>
- Bales, D. J. & Wagner, R. C. (2009). *Sources of uncertainty in flood inundation maps* Journal of Flood Risk Management, 2, 139-147.
- Banenor. (2016) *InterCity Dovrebanen- Fagrapport hydrologi*. Hentet 22.04.2018, fra <http://www.banenor.no/contentassets/619780aacbe845a8968fd736962cd703/fagrapport-hydrologi.pdf>
- Barredo, I. J. (2007). *Major flood disasters in Europe: 1950-2005*. Nat Hazards 42, 125-148.
- Bater, W. C. & Coops, C. N. (2009). *Evaluating error associated with lidar-derived DEM interpolation*. Computers & Geosciences., 35(2), 289-300.
- Berthelsen, O. (2012). *Hvordan leve med farene - om flom og skred*. Hentet 08.10.2017, fra <http://www.regjeringen.no/nb/dep/oed/dok/regpubl/stmeld/2011-2012/meld-st-15-20112012/1.html?id=676527#>
- Beven, K. & Wood, F. E. (1983). *Catchment geomorphology and the dynamics of runoff contributing areas*. Journal of hydrology, 65, 139-158.
- Brunner, W. G. (1996). *HEC-RAS - River Analysis System*. Hentet 02.02, 2018, fra <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a311952.pdf>
- Brunner, W. G. (2016). *HEC-RAS River Analysis System - Hydraulic Reference Manual* Hentet 02.02, 2018, fra <http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Reference%20Manual.pdf>
- Bryan, R. B. (2000). *Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope*. Geomorphology. 32, 385-415.
- Buckley, S. J., Howell, J. A., Enge, H. D. & Kurz, T. H. (2008). *Terrestrial laser scanning in geology: data acquisition, processing and accuracy considerations*. Journal of the Geological Society, 165(3), 625-638.
- Cerdà, A. (1995). *Seasonal variability of infiltration rates under contrasting slope conditions in southeast Spain*. Geoderma, 69, 217-232.

- Childs, C. (2004). *Interpolating surfaces in ArcGIS spatial analyst*. ArcUser July-September, 32-35.
- Chow, T. V. (1959). *Open Channel Hydraulics*. University of Illinois McGRAW-HILL BOOK COMPANY, INC.
- Duran, Z. V. H. & Rodríguez, P. C. R. (2007). *Soil-erosion and runoff prevention by plant covers*. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 28, 65-86.
- Engeland, K., Hisdal, H., Orthe, K. N., Øverleir-Petersen, A. & Voksø, A. (2008). *Lavvannskart for Norge*. Hentet 10.12, 2017, fra http://publikasjoner.nve.no/oppdragsrapportA/2008/oppdragsrapportA2008_05.pdf
- Esri. (2008). *About the ESRI Grid format*. Hentet 02.12, 2018, fra http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=About_the_ESRI_grid_for_mat
- Esri. (2016a). *Creating a LAS dataset*. Hentet 12.02, 2017, fra <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/las-dataset/creating-a-las-dataset.htm>
- Esri. (2016b). *How Slope works*. Hentet 03.02, 2018, fra <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-slope-works.htm>
- Esri. (2017). *How Fill works*. Hentet 06.04, 2018, fra <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-fill-works.htm>
- Fergus, T., Høydal, A. Ø., Johnsrud, E. T., Sandersen, F. & Schanche, S. (2010a). *Skogsveger og skredfare - veileder*. Hentet 05.12, 2017, fra http://www.skogkurs.no/userfiles/files/skogsveier/l_smasseskred_veileder_A4_140711.pdf
- Fergus, T., Hoseth, K., and Sæterbø, E. (2010b). *Vassdragshåndboka: håndbok i vassdragsteknikk*. Trondheim: Tapir akademiske forlag.
- Fisher, P. F. & Tate, J. N. (2006). *Causes and consequences of error in digital elevation models* *Progress. Physical Geography*, 30(4), 467-489.
- Gilli, É., Mangan, C. & Mudry, J. (2012). *Hydrogeology: Objectives, Methods, Applications*. Science Publishers: CRC Press.
- Gruber, S & Peckham, S. (2009). *Land-Surface Parameters and Objects in Hydrology* IT. & Reuter Hengl, I. H. (red.), *Geomorphometry: Concepts, Software and Applications*. (s. 171-194).
- Gudbrandsdølen Dagingen. (2017a). *Stengte E6 i åtte timer som følge av voldsomt nedbør*. Hentet 22.04, 2018, fra <https://www.gd.no/nyheter/trafikk/e6/stengte-e6-i-atte-timer-som-folge-av-voldsomt-nedbør/s/5-18-479817>

Gudbrandsdølen Dagningen. (2017b). *Registrerte 76,8 millimeter regn på et døgn*. Hentet 22.04, 2018, fra <https://www.gd.no/nyheter/var/flom/registrerte-76-8-millimeter-regn-pa-et-dogn/s/5-18-479880>

Hansen, B. I., Førland, J. E., Haddeland, I., Hisdal, H., Mayer, S., Nesje, A., & Ådlandsvik, B. (2015). *Klima i Norge i 2100 - Kunnskapsgrunnlag for klimatilpasning oppdatert i 2015*. Hentet 12.02, 2017, fra https://cms.met.no/site/2/klimaservicesenteret/rapporter-og-publikasjoner/_attachment/6616?_ts=14ff3d4eeb8

Hengl, T. (2006). *Finding the right pixel size*. *Computers & Geosciences*, 32(9), 1283-1298.

Hengl, T. & Evans, S. I. (2009). *Mathematical and Digital Models of the Land Surface*. I T. & Reuter Hengl, I. H. (red.), *Geomorphometry: Concepts, Software and Applications* (s. 31-63).

Hennig, M. I. (2015). *Flomvei og aktsomhetskartlegging ved bruk av GIS over nedbørsfeltet Brandrudsåa i Gudbrandsdalen*. (Master), Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.

Hisdal, H. (2008). *Oppdatering av fremtidige flomstørrelser - Hva kan vi vite om fremtidige flommer?*. Hentet 23.04.2018, fra https://www.vegvesen.no/_attachment/61066/binary/13654

Horrit, M.S. & Bates, P. D. (2002). *Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation*. *Journal of Hydrology* 268, 87-99.

Hunter, M. N., Bates, D. P., Horrit, S. M. & Wilson, D. M. (2007). *Simple spatially-distributed models for predicting flood inundation: A review*. *Geomorphology*. 90 (2007), 208-225.

Huntington, G. T. (2006). *Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis*. *Journal of Hydrology*, 319, 83-95.

Innlandsgis. (2018). *Innlandsgis*. Hentet 09.01, 2018, fra <https://geocortex3.innlandsgis.no/Html5ViewerNorsk/index.html?viewer=InnlandsGIS.InnlandsGIS&locale=nb#>

Istanbullouglu, E. & Bras, R. L. (2005). *On the dynamics of soil moisture, vegetation and erosion: Implications of climate variability and change*. *Water Resources Research*, 42, Ukjent.

Iwata, Y., Nemoto, M., Hasegawa, S., Yanai, Y., Kuwao, K. & Hirota, T. (2011). *Influence of rain, air temperature, and snow cover on subsequent spring-snowmelt infiltration into thin frozen soil layer in northern Japan*. *Journal of hydrology*, 401, 165-176.

Jenssen, L. & Tesaker, E. (2009). *Veileder for dimensjonering av erosjonssikring av stein*. Hentet 05.02.2018 fra http://publikasjoner.nve.no/veileder/2009/veileder2009_04.pdf

Jørgensen, P., Sørensen, R. & Haldorsen, S. (1997). *Kvartærgeologi*. Otta. Landbruksforlaget.

Kartverket. (2017). *Sentral felles kartdatabase*. Hentet 17.04. 2018, fra <https://www.kartverket.no/Prosjekter/Sentral-felles-kartdatabase/>

- Kartverket. (2018). *Høydedata og terrengmodeller fra Kartverket*. Hentet 19.04, 2018, fra <https://www.kartverket.no/data/laserskanning/>
- Knebl, M. R., Yang, Z. L., Hutchison, K. & Maidment, D. R. (2005). *Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event*. *Journal of Environmental Management* 75, 325-336.
- Knox, J. C. (1977). *Human Impacts On Wisconsin Stream Channels*. *Annals of the Association of American Geographers*, 67(3), 323-342.
- Lebourg, T., Riss, J. & Pirard, E. (2004). *Influence of morphological characteristics of heterogeneous moraine formations on their mechanical behaviour using image and statistical analysis*. *Engineering Geology*, 73(1), 37-50.
- Legendre, P. (1993). *Spatial Autocorrelation: Trouble or New Paradigm*. *Ecology* 74 (6), 1659-1673.
- Lichti, D. D. & Jamtsho, S. (2006). *Angular resolution of terrestrial laser scanners*. *The photogrammetric record*, 21(114), 141-160.
- Lindholm, O., Milina, J., Myrabø, S., Sægrov, S. & Selseth, I. (1999). *Urbaniserte områders innvirkning på flomforhold*. Hentet 08.04. 2018, fra <http://publikasjoner.nve.no/hydra/rapport/t02.pdf>
- Liu, X., Zhang, Z., Peterson, J., & Chandra, S. (2007). *The effect of LiDAR data density on DEM accuracy*. *Proceedings of the International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM07)*, Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand Inc.
- Liu, X. (2008). *Airborne lidar for dem generation: some critical issues*. *Progress in Physical Geography*, 32(1), 31-49.
- Lohani, B. (2008). *Airborne Alimetric LiDAR: Principle, Data collection, processing and Applications*. Hentet 04.03, 2018, fra http://home.iitk.ac.in/~blohani/LiDARSchool2008/Downloads/LiDAR_notes/LiDAR_Full_Notes.pdf
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J. & Rhind, D.W. (2005). *Geographic Information Systems and Science*. (2.utg). John Wiley & Sons, Ltd.
- Lunde, H. I. (2017). *Hydrologi/Hydraulikk - Reguleringsplan E134 Espelandssvingane*. Hentet 19.04, 2018, fra https://www.vegvesen.no/_attachment/1790330/binary/1172757?fast_title=Hydrologirapport.pdf
- Lysen, D. (1972). *Selvrensing i rør for avløpsvann*. *Vann*, 3, 221-226.
- Mangerud, J. (1965). *Dalfyllinger i noen sidedaler til Gudbrandsdalen, med bemerkninger om Norge mammutfunn*. *Norsk geologisk tidsskrift*, 45, 200- 226.

- McCullagh, M. (1988). *Terrain and surface modelling systems: theory and practice*. The photogrammetric record, 12(72), 747-779.
- Merwade, V., Olivera, F., Arabi, M. & Edleman, S. (2008). *Uncertainty in Flood Inundation Mapping: Current Issues and Future Directions*. Journal of Hydrologic engineering, 13(7), 608-620
- Met.no. (2016). *Klimaprofil Oppland - Et kunnskapsgrunnlag for klimatilpasning*. Hentet 17.02, 2018, fra https://cms.met.no/site/2/klimaservicesenteret/klimaprofiler/klimaprofil-oppland/_attachment/12035?_ts=15d9d3c1d03
- Met.no. (2018). *Østlandet siden 1900*. Hentet 17.01, 2018, fra <https://www.met.no/vaer-og-klima/klima-siste-150-ar/regionale-kurver/ostlandet-siden-1900>
- Middtømme, H. G., Pettersson, E. L., Holmqvist, E., Nøtsund, Ø., Hisdal, H. & Sivertsgård, R. (2011). *Retningslinjer for flomberegninger*. Hentet 11.02, 2018 fra http://publikasjoner.nve.no/retningslinjer/2011/retningslinjer2011_04.pdf
- Mie, L., Selseth, I., Sægrov, S., Vagle, A. O. & Andrianov, A. (2012). *Flomfrekvensanalyse og flomvannlinjeberegninger for byvassdrag*. Hentet 08.02.2018, fra https://vannforeningen.no/wp-content/uploads/2015/06/2012_847606.pdf
- Moen, A. (1998). *Nasjonlatlas for Norge: Vegetasjon*. Hønefoss: Statens Kartverk.
- Montgomery, D. R. & Buffington, J. M. (1997). *Channel-reach morphology in mountain drainage basins*. Geological Society of America Bulletin, 109(5), 596-611.
- Murphy, P. N., Ogilvie, C. J., Meng, F. R. & Arp, P. (2008). "Stream network modelling using lidar and photogrammetric digital elevation models: a comparison and field verification." Hydrological Processes, 22(12), 1747-1754.
- Nelson, A., Reuter, H. I. & Gessler, P. (2009). *Chapter 3 DEM Production Methods and Sources*. Developments in Soil Science. 33, 65-85.
- Nevina. (2015). *Nevina (Nedbørfelt-Vannføring-INdeks-Analyse) Lavvannsverktøy, Brukerveiledning*. Hentet 09.10, 2017, fra http://nevina.nve.no/help/Brukerveiledning_NEVINA.pdf
- NGU. (2018a). *Løsmasse*. Hentet 10.03, 2018, fra <http://geo.ngu.no/kart/losmasse/>
- NGU. (2018b). *Infiltrasjonsevne*. Hentet 04.04, 2018, fra <http://geo.ngu.no/kart/losmasse/>
- Nibio. (2018). *Nedlastning av kartdata*. Hentet 09.03, 2018, fra <https://www.nibio.no/tjenester/nedlasting-av-kartdata>
- NIFS. (2013). *Om prosjektet* Hentet 08.10, 2017, fra <http://www.naturfare.no/>
- Norgeskart. (2018). *Norgeskart*. Hentet 09.09, 2017, fra <http://www.norgeskart.no/#!?project=seeiendom&layers=1002,1015&zoom=4&lat=7197864.00&lon=396722.00>

- NRK. (2013). *Flommen i Gudbrandsdalen er ute av kontroll*. Hentet 02.01, 2018, fra <https://www.nrk.no/norge/evakuerer-folk-over-hele-sor-norge-1.11038824>
- NRK. (2017). *Denne skal stoppe en 200-års flom*. Hentet 09.01, 2018, fra <https://www.nrk.no/ho/denne-skal-stoppe-en-200-ars-flom-1.13537380>
- Nummeropplysningen 1881. (2018). *Kart*. Hentet 19.04, 2018, fra <https://kart.1881.no/veibeskrivelse>
- NVE. (1997). *Anvendt urbanhydrologi* Hentet 02.01, 2018, fra http://publikasjoner.nve.no/publikasjon/1997/publikasjon1997_10.pdf
- NVE. (1998). *Vassdrags håndboka-Håndbok i forebyggingsteknikk og vassdragsmiljø*. Trondheim: Tapir Forlag.
- NVE. (2011). *Skogsveger og skredfare – veileder*. Hentet 10.12, 2017, fra <http://publikasjoner.nve.no/diverse/2011/skogsveggerskredfare2011.pdf>
- NVE. (2013). *Faktaark jordskred og flomskred*. Hentet 22.10.2018, fra http://publikasjoner.nve.no/faktaark/2013/faktaark2013_05.pdf
- Nystuen, J. P. (2007). *Jorda skifter ansikt*. I I. B. Ramberg, I. Bryhni & A. Nøttvedt (Red), Landet blir til, Norges geologi. Trondheim: Norsk Geologisk Forening.
- Ollesch, G., Sukhanovski, Y., Kistner, I., Rode, M. & Meissner, R. (2005). *Characterization and modelling of the spatial heterogeneity of snowmelt erosion*. Earth Surface Processes and Landforms, 30, 197-211.
- Olsen, L., Sveian, H., Ottesen, D., Rise, L. (2013). *Quaternary glacial, interglacial and interstadial deposits of Norway and adjacent onshore and offshore areas*. I O. and Olesen I L. F. Olsen, O. (Red.) (red.), Quaternary Geology of Norway, Geological Survey of Norway Special Publication. Trondheim: Norges Geologiske Undersøkelser.
- Olsen, H. M. (2014). *Effekten av menneskelige inngrep på avrenning og materialtransport under en større nedbørshendelse. Case studier fra Gudbrandsdalen etter flommen i 2013*. (Master), Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- Olsen, H. M., Hopland, A. A., Myrabø, S., Virèhn, P. & Glad, A. P. (2015). *Flom- og skredhendelser i Gudbrandsdalen- Naturfareprosjektet: Delprosjekt 5.3 Hendelser og kostnader*. Hentet 11.10, 2017, fra http://publikasjoner.nve.no/rapport/2015/rapport2015_123.pdf
- Pappenberger, F., Beven, K., Horrit, M., & Blazkova, S. (2005). *Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations*. Journal of Hydrology, 302, 46-69.
- Pearce, J. A. (1975). *Magnitude and frequency of erosion by Hortonian overland flow*. Journal of Geology, 1976(84), 65-80.

rbnett.no. (2017). *Gudbrandsdalen åpen igjen*. Hentet 22.04, 2018, fra <http://www.rbnett.no/nyheter/2017/07/24/Gudbrandsdalen-%C3%A5pen-igjen-15058335.ece>

Regjeringen.no. (2008). *Klimatilpasning i Norge - Regjeringens arbeid med tilpasning til klimaendringene*. Hentet 07.01, 2018, fra https://www.regjeringen.no/globalassets/upload/md/vedlegg/klima/klimatilpasning/klimatilpasning_redegjorelse150508.pdf

Rekolainen, S. (1989). *Effect of snow and soil frost melting on the concentrations of suspended solids and phosphorus in two rural watersheds in Western Finland*. *Aquatic Science* 51(3), 211-223.

Reuter, H., Hengl, T., Gessler, P., and Soille, P. (2009). *Preparation of Dems for geomorphometric analysis*. *Developments in Soil Science*, 33(87).

Riegl Laser Measurement systems. (2017). *RIEGL VZ-1000*. Hentet 03.04, 2018, fra https://www.3dlasermapping.com/wp-content/uploads/2017/10/DataSheet_VZ-1000_2017-06-14.pdf

Rød, K. J. (2015). *GIS - Verktøy for å forstå verden*: Fagbokforlaget.

Selby, M. J. (2005). *Hillslope materials and processes*. New York: Oxford University Press

Sellevoid, J. & Edvardsen, D. H. (2013). *Vannhåndtering i prosjektet E6 Biri-Otta: SVV, JBV, Multiconsult, Reinertsen*

Singhal, M.K., Mohan, J. & Agrawal, A. K. (1980). *Role of grainshear stress in sediment transport*. *Irrigation and power*, 37, 105-108.

Solheim, B. E. (2017). *Infiltrasjon for lokal overvannsdiskonering (LOD) - Vurdering av metoder for å måle infiltrasjon på lokal tomt*. (Master), Norges miljø- og biovitenskapelige universitet, Brage.Bibsys.no Hentet fra https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/2443302/Masteroppgave_Solheim_2017_NMBU.pdf?sequence=1

Sollid, J. L. & Sørbel, L. (1994). *Distribution of glacial landforms in southern Norway in relation to the thermal regime of the last continental ice sheet*. *Geografiska Annaler. Series A. Physical Geography*, 25-35.

Stenius, S., Glad, A. P., Wang, K. T. & Væringstad, T. (2015). *Veileder for flomberegninger i små uregulerte felt*. Hentet 08.01.2018, fra http://publikasjoner.nve.no/veileder/2015/veileder2015_07.pdf

Store Norske leksikon. (2009). *Kvartær*. Hentet 23.02, 2018 fra <https://snl.no/kvart%C3%A6r>

Store Norske leksikon. (2017). *Gudbrandsdalslågen*. Hentet 09.01.2018, fra <https://snl.no/Gudbrandsdalsl%C3%A5gen>

Svendsen, J. I., Alexanderson, H., Astakhov, V. I., Demidov, I., Dowdeswell, J. A., Funder, S. et al. (2004). *Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia*. *Quaternary Science Reviews*, 23(11), 1229-1271.

Svingheim, N. (2013). *Ønsker overordnet plan for Gudbrandsdalen*. Hentet 12.04.2018, fra <http://www.banenor.no/Nyheter/Nyhetsarkiv/2013/Onsker-overordnet-plan-for-Gudbrandsdalen/>

Søndena, H. M. (2017). *Hydrologisk dimensjonering i små nedbørfelt - Evaluering av metodene*. (Master), Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.

Sør-Fron Kommune. (2017). *Lokalt styrtregn ga flom 23. og 24. juli 2017*. Hentet 22.04, 2018, fra <https://www.fylkesmannen.no/Images/Bilder%20FMOP/Samfunnssikkerhet/Beredskap/2017-10-23%20-%20Orientering%20p%C3%A5%20beredskapsm%C3%B8te%202017-10-24.pdf>

Tarbaton, G. D. (2003). *Chapter 2 - Runoff Generation Mechanisms*. Hentet 09.12, 2017, fra <http://hydrology.usu.edu/RRP/userdata/4/87/ch2.pdf>

Tate, E. C., Maidment, R. D., Olivera, F. & Anderson, J. D. (2002). *Creating a Terrain Model for Floodplain Mapping*. *Journal of Hydrologic engineering*, 7(2), 100-108.

Tesaker, E., Fergus, T., Lyche, E. & Bargel, T. (2010). *Erosjon, massetransport og skred*. I K. A. Hoseth & E. Sæterbø T. Fergus (red.), *Vassdragshåndboka Trondheim: Tapir Akademiske Forlag*.

The National Archives. (2010). *Remote sensing techniques*. Hentet 10.05, 2018, fra <http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20101014084124/http://www.searchmesh.net/Default.aspx?page=1735>

Tveiterå, K. (2016). *Dimensjonering av stikkrenner på skogsbilveg*. (Master), Norges miljø- og biovitenskapelige universitet. Hentet fra <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/2403753>

Vatne, G. (2013). *Styrtflommer og klimaendring*. I M. L. Bye, Lein, H. & Rød, K. J. (red.), *Mot en farligere framtid? Om klimaendringer, sårbarhet og tilpasning i Norge* (s. 51-67). Trondheim: Akademika forlag

Waagø, S. O. (2012). *Flomrisikoplan for Gaula ved Melhus – Et eksempel på en flomrisikoplan etter EUs flomdirektiv*. Hentet 11.04, 2018 fra http://publikasjoner.nve.no/rapport/2012/rapport2012_08.pdf

Wang, G., Joyce, J., Phillips, D., Shrestha, R. & Carter, W. (2013). *Delineating and defining the boundaries of an active landslide in the rainforest of Puerto Rico using a combination of airborne and terrestrial LIDAR data*. *Landslides*, 1-11.

Wohl, E. (2006). *Human impacts to mountain streams*. *Geomorphology*, 79(3), 217-248.

Woolhiser, A., D., Smith, R. E. & Giraldez, J., V. (1996). Effects of spatial variability of saturated conductivity on Hortonian overland flow. *Water Resources Research*, 32(3), 671-678.

Yang, J., Townsend, D. R. & Daneshfar, B. (2006). *Applying the HEC-RAS model and GIS techniques in river network floodplain delineation*. *Canadian Journal of Civil Engineering* 33(1), 19-28.

10 Appendix A

10.1 Flomutbredelse, Ysteri- og Eksisvegen

Flomutbredelse i Brandrudsåa



Kartet viser flomutbredelsen for en 100-årsflom med en vannmengde på 2,8 m³/s. Insetkartet viser et utsatt område nedstrøms i elva.

Beskrivelse

- Brandrudsåa
- Utbredelse 100-årsflom

Author: Petter O. Aasen
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984

Flomutbredelse i Brandrudsåa



Kartet viser flomutbredelsen for en 200-årsflom med en vannmengde på 3,2 m³/s. Insetkartet viser et utsatt område nedstrøms i elva.

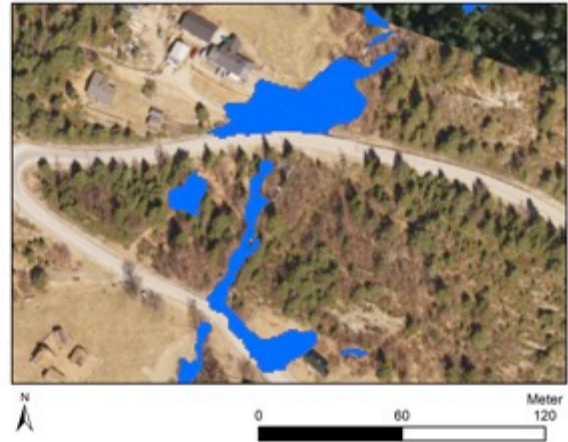
Beskrivelse

- Brandrudsåa
- Utbredelse 200-årsflom

Author: Petter O. Aasen
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984

10.2 Flomutbredelse, Kvarrvegen

Flomutbredelse i Brandrudsåa



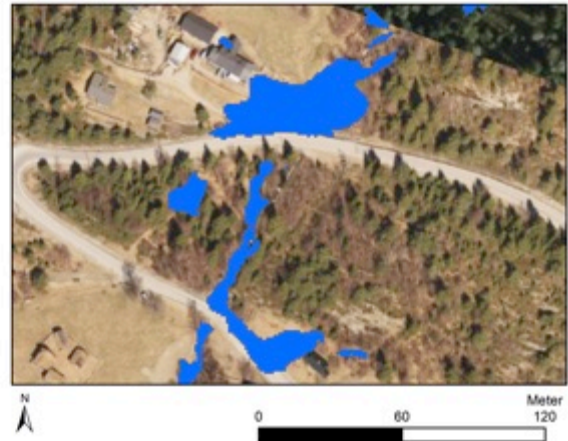
Kartet viser flomutbredelsen for en 100-årsflom med en vannmengde på 2,8 m³/s. Insetkartet viser et utsatt område oppstrøms i elva.

Beskrivelse

- Brandrudsåa
- Utbredelse 100-årsflom

Author: Petter O. Aasen
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984

Flomutbredelse i Brandrudsåa



Kartet viser flomutbredelsen for en 200-årsflom med en vannmengde på 3,2 m³/s. Insetkartet viser et utsatt område oppstrøms i elva.

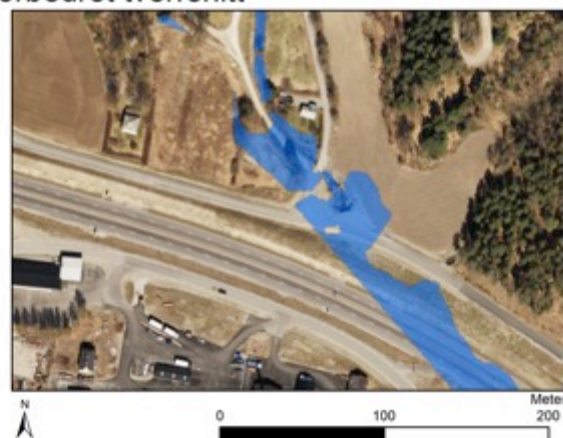
Beskrivelse

- Brandrudsåa
- Utbredelse 200-årsflom

Author: Petter O. Aasen
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984

10.3 Forbedret tverrsnitt, Ysteri- og Eksisvegen

Brandrudsåa med forbedret tverrsnitt



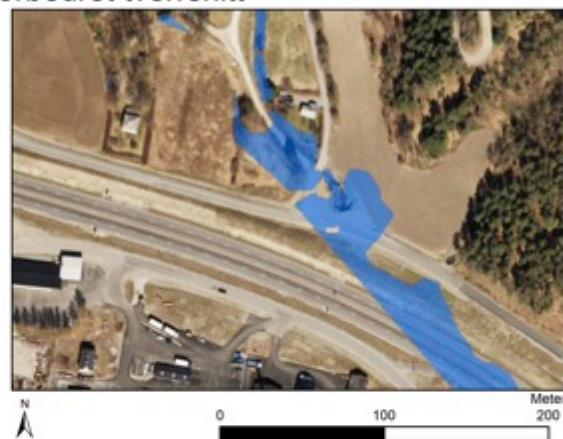
Kartet viser flomutbredelse med forbedret tverrsnitt for en 100-årsflom med en vannmengde på 2,8 m³/s. Insetkartet viser et utsatt område nedstrøms i elva.

Beskrivelse

- Brandrudsåa
- Utbredelse 100-årsflom

Author: Petter O. Aasen
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984

Brandrudsåa med forbedret tverrsnitt



Kartet viser flomutbredelse med forbedret tverrsnitt for en 200-årsflom med en vannmengde på 3,2 m³/s. Insetkartet viser et utsatt område nedstrøms i elva.

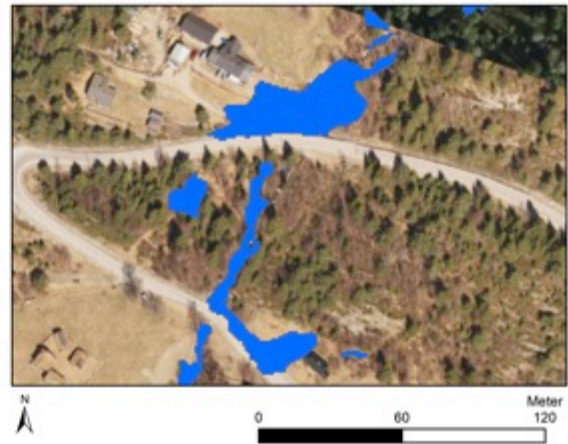
Beskrivelse

- Brandrudsåa
- Utbredelse 200-årsflom

Author: Petter O. Aasen
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984

10.4 Forbedret tverrsnitt, Kvarvvegen

Brandrudsåa med forbedret tverrsnitt



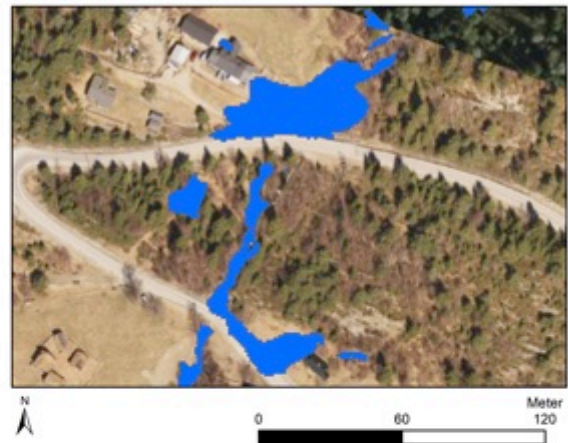
Kartet viser flomutbredelsen med forbedret tverrsnitt for en 100-årsflom med en vannmengde på 2,8 m³/s. Insetkartet viser et utsatt område oppstrøms i elva.

Beskrivelse

- Brandrudsåa
- Utbredelse 100-årsflom

Author: Petter O. Aasen
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984

Brandrudsåa med forbedret tverrsnitt



Kartet viser flomutbredelsen med forbedret tverrsnitt for en 200-årsflom med en vannmengde på 3,2 m³/s. Insetkartet viser et utsatt område oppstrøms i elva.

Beskrivelse

- Brandrudsåa
- Utbredelse 200-årsflom

Author: Petter O. Aasen
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984

10.5 Blokkerte kulverter med forbedret tverrsnitt, Ysteri- og Eksisvegen

Blokkerte kulverter med forbedret tverrsnitt



Kartet viser flomutbredelse med forbedret tverrsnitt og blokkerte kulverter for en 100-årsflom med en vannmengde på 2,8 m³/s. Insetkartet viser et utsatt område nedstrøms i elva.

Beskrivelse

- Brandrudsåa
- Utbredelse 100-årsflom

Author: Petter O. Aasen
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984

Blokkerte kulverter med forbedret tverrsnitt



Kartet viser flomutbredelse med forbedret tverrsnitt og blokkerte kulverter for en 200-årsflom med en vannmengde på 3,2 m³/s. Insetkartet viser et utsatt område nedstrøms i elva.

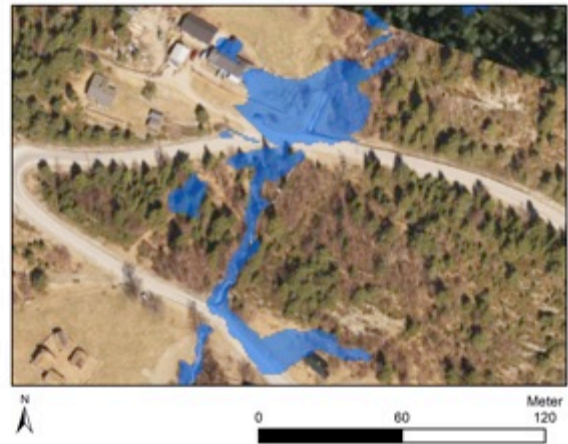
Beskrivelse

- Brandrudsåa
- Utbredelse 200-årsflom

Author: Petter O. Aasen
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984

10.6 Blokkerte kulverter med forbedret tverrsnitt, Kvarrvegen

Blokkerte kulverter med forbedret tverrsnitt



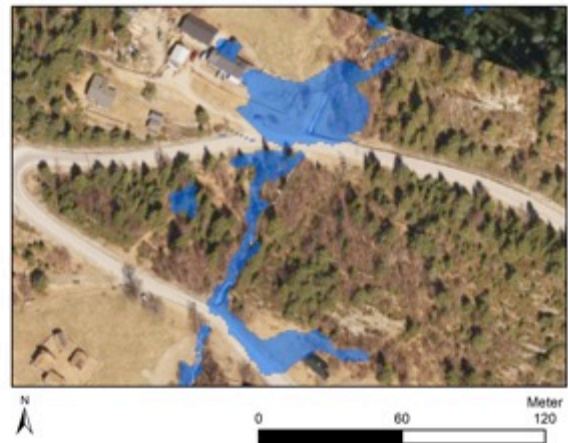
Beskrivelse

- Brandrudsåa
- Utbredelse 100-årsflom

Kartet viser flomutbredelsen med forbedret tverrsnitt og blokkerte kulverter for en 100-årsflom med en vannmengde på 2,8 m³/s. Insetkartet viser et utsatt område oppstrøms i elva.

Author: Petter O. Aasen
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984

Blokkerte kulverter med forbedret tverrsnitt



Beskrivelse

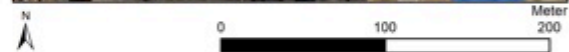
- Brandrudsåa
- Utbredelse 200-årsflom

Kartet viser flomutbredelsen med forbedret tverrsnitt og blokkerte kulverter for en 200-årsflom med en vannmengde på 3,2 m³/s. Insetkartet viser et utsatt område oppstrøms i elva.

Author: Petter O. Aasen
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984

10.7 Blokkerte kulverter med forbedret tverrsnitt og grid, Ysteri- og Eksisvegen

Blokkerte kulverter, med grid og forbedret tverrsnitt



Kartet viser flomutbredelse med forbedret tverrsnitt og grid, samt blokkerte kulverter for en 100-årsflom med en vannmengde på 2,8 m³/s. Insetkartet viser et utsatt område nedstrøms i elva.

Beskrivelse

- Brandruddsåa
- Utbredelse 100-årsflom

Author: Petter O. Aasen
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984

Blokkerte kulverter, med grid og forbedret tverrsnitt



Kartet viser flomutbredelse med forbedret tverrsnitt og grid, samt blokkerte kulverter for en 200-årsflom med en vannmengde på 3,2 m³/s. Insetkartet viser et utsatt område nedstrøms i elva.

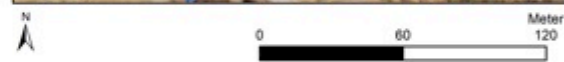
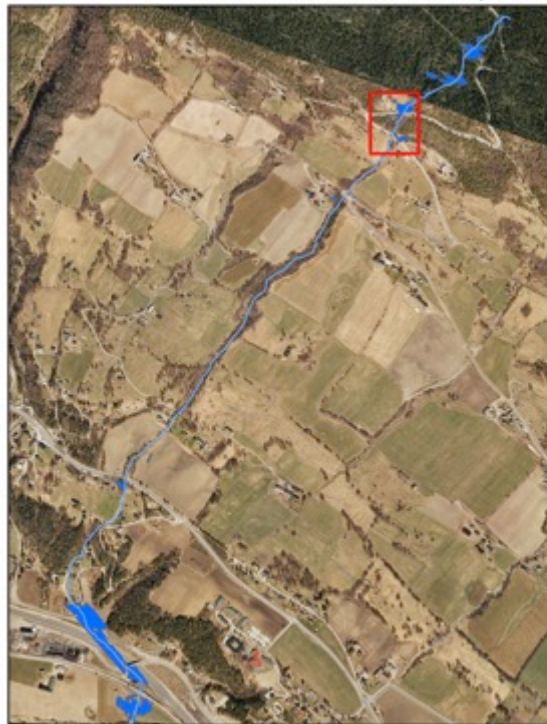
Beskrivelse

- Brandruddsåa
- Utbredelse 200-årsflom

Author: Petter O. Aasen
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984

10.8 Blokkerte kulverter, med forbedret tverrsnitt og grid, Kvarrvegen

Blokkerte kulverter, med grid og forbedret tverrsnitt



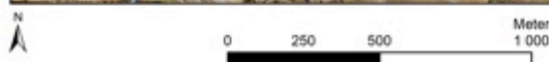
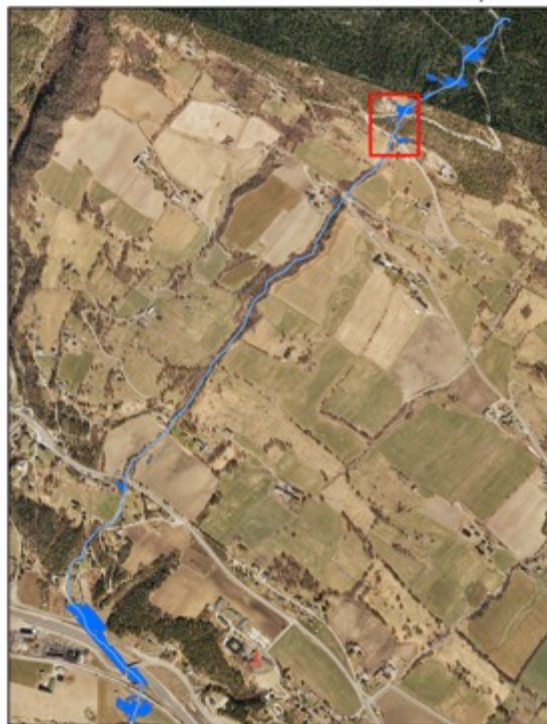
Kartet viser flomutbredelsen med forbedret tverrsnitt og grid, samt blokkerte kulverter for en 100-årsflom med en vannmengde på 2,8 m³/s. Insetkartet viser et utsatt område oppstrøms i elva.

Beskrivelse

- Brandruddsåa
- Utbredelse 100-årsflom

Author: Petter O. Aasen
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984

Blokkerte kulverter, med grid og forbedret tverrsnitt



Kartet viser flomutbredelsen med forbedret tverrsnitt og grid, samt blokkerte kulverter for en 200-årsflom med en vannmengde på 3,2 m³/s. Insetkartet viser et utsatt område oppstrøms i elva.

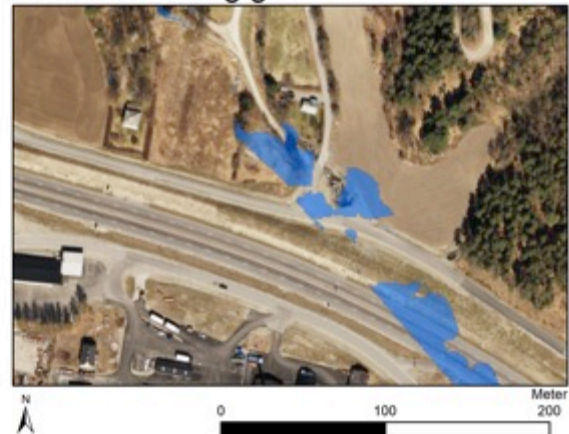
Beskrivelse

- Brandruddsåa
- Utbredelse 200-årsflom

Author: Petter O. Aasen
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984

10.9 Forbedret tverrsnitt med grid, Ysteri- og Eksisvegen

Brandrudsåa med forbedret tverrsnitt og grid



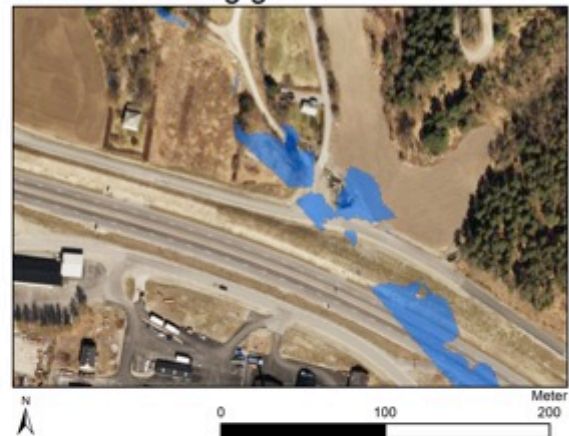
Kartet viser flomutbredelse med forbedret tverrsnitt og grid for en 100-årsflom med en vannmengde på 2,8 m³/s. Insetkartet viser et utsatt område nedstrøms i elva.

Beskrivelse

- Brandrudsåa
- Utbredelse 100-årsflom

Author: Petter O. Aasen
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984

Brandrudsåa med forbedret tverrsnitt og grid



Kartet viser flomutbredelse med forbedret tverrsnitt og grid for en 200-årsflom med en vannmengde på 3,2 m³/s. Insetkartet viser et utsatt område nedstrøms i elva.

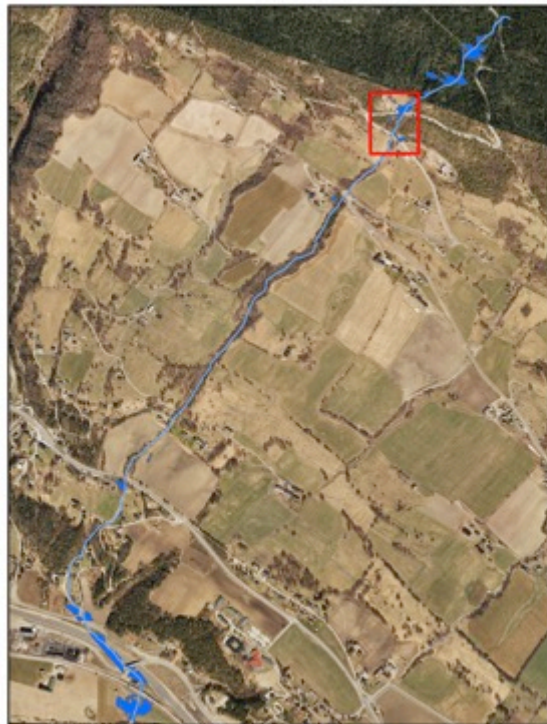
Beskrivelse

- Brandrudsåa
- Utbredelse 200-årsflom

Author: Petter O. Aasen
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984

10.10 Forbedret tverrsnitt og grid sted, Kvarvvegen

Brandrudsåa med forbedret tverrsnitt og grid



Meter
0 250 500 1000



Meter
0 60 120

Kartet viser flomutbredelsen med forbedret tverrsnitt og grid for en 100-årsflom med en vannmengde på 2,8 m³/s. Insetkartet viser et utsatt område oppstrøms i elva.

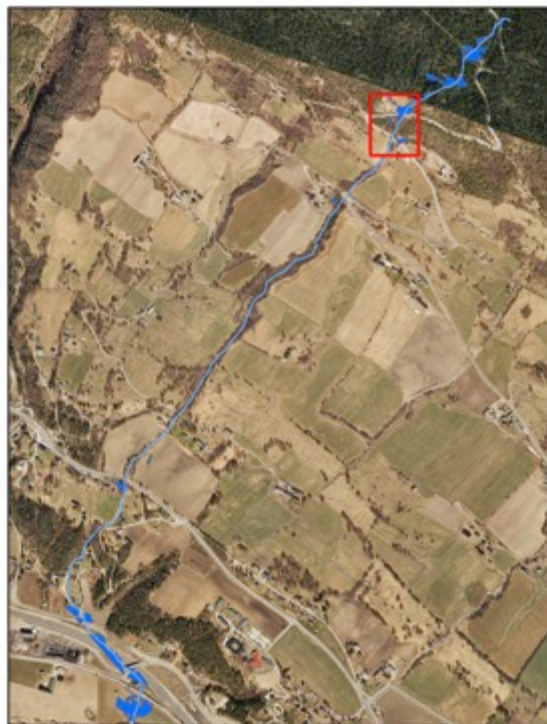
Beskrivelse

- Brandrudsåa
- Utbredelse 100-årsflom

Author: Petter O. Aasen

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984

Brandrudsåa med forbedret tverrsnitt og grid



Meter
0 250 500 1000



Meter
0 60 120

Kartet viser flomutbredelsen med forbedret tverrsnitt og grid for en 200-årsflom med en vannmengde på 3,2 m³/s. Insetkartet viser et utsatt område oppstrøms i elva.

Beskrivelse

- Brandrudsåa
- Utbredelse 200-årsflom

Author: Petter O. Aasen

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984

10.11 Klimapåslag 200-årsflom, Ysteri- og Eksisvegen og Kvarrvegen

Brandrudsåa med klimapåslag for 200-årsflom



Beskrivelse

- Brandrudsåa
- Utbredelse 200-årsflom

Kartet viser flomutbredelse for en 200-årsflom med klimapåslag og en vannmengde på 5 m³/s. Insetkartet viser et utsatt område nedstrøms i elva.

Author: Petter O. Aasen

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984

Brandrudsåa med klimapåslag for 200-årsflom



Beskrivelse

- Brandrudsåa
- Utbredelse 200-årsflom

Kartet viser flomutbredelse for en 200-årsflom med klimapåslag og en vannmengde på 5 m³/s. Insetkartet viser et utsatt område nedstrøms i elva.

Author: Petter O. Aasen

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984

10.12 Mannings n -verdiër

Chapter 3– Basic Data Requirements

Table 3-1 Manning's 'n' Values

Type of Channel and Description	Minimum	Normal	Maximum
A. Natural Streams			
1. Main Channels			
a. Clean, straight, full, no rifts or deep pools			
b. Same as above, but more stones and weeds	0.025	0.030	0.033
c. Clean, winding, some pools and shoals	0.030	0.035	0.040
d. Same as above, but some weeds and stones	0.033	0.040	0.045
e. Same as above, lower stages, more ineffective slopes and sections	0.035	0.045	0.050
f. Same as "d" but more stones	0.040	0.048	0.055
g. Sluggish reaches, weedy, deep pools	0.045	0.050	0.060
h. Very weedy reaches, deep pools, or floodways with heavy stands of timber and brush	0.050	0.070	0.080
	0.070	0.100	0.150
2. Flood Plains			
a. Pasture no brush			
1. Short grass	0.025	0.030	0.035
2. High grass	0.030	0.035	0.050
b. Cultivated areas			
1. No crop	0.020	0.030	0.040
2. Mature row crops	0.025	0.035	0.045
3. Mature field crops	0.030	0.040	0.050
c. Brush			
1. Scattered brush, heavy weeds	0.035	0.050	0.070
2. Light brush and trees, in winter	0.035	0.050	0.060
3. Light brush and trees, in summer	0.040	0.060	0.080
4. Medium to dense brush, in winter	0.045	0.070	0.110
5. Medium to dense brush, in summer	0.070	0.100	0.160
d. Trees			
1. Cleared land with tree stumps, no sprouts	0.030	0.040	0.050
2. Same as above, but heavy sprouts	0.050	0.060	0.080
3. Heavy stand of timber, few down trees, little undergrowth, flow below branches	0.080	0.100	0.120
4. Same as above, but with flow into branches	0.100	0.120	0.160
5. Dense willows, summer, straight	0.110	0.150	0.200
3. Mountain Streams, no vegetation in channel, banks usually steep, with trees and brush on banks submerged			
a. Bottom: gravels, cobbles, and few boulders	0.030	0.040	0.050
b. Bottom: cobbles with large boulders	0.040	0.050	0.070

Table 3-1 (Continued) Manning's 'n' Values

Type of Channel and Description	Minimum	Normal	Maximum
B. Lined or Built-Up Channels			
1. Concrete			
a. Trowel finish	0.011	0.013	0.015
b. Float Finish	0.013	0.015	0.016
c. Finished, with gravel bottom	0.015	0.017	0.020
d. Unfinished	0.014	0.017	0.020
e. Gunite, good section	0.016	0.019	0.023
f. Gunite, wavy section	0.018	0.022	0.025
g. On good excavated rock	0.017	0.020	
h. On irregular excavated rock	0.022	0.027	
2. Concrete bottom float finished with sides of:			
a. Dressed stone in mortar	0.015	0.017	0.020
b. Random stone in mortar	0.017	0.020	0.024
c. Cement rubble masonry, plastered	0.016	0.020	0.024
d. Cement rubble masonry	0.020	0.025	0.030
e. Dry rubble on riprap	0.020	0.030	0.035
3. Gravel bottom with sides of:			
a. Formed concrete	0.017	0.020	0.025
b. Random stone in mortar	0.020	0.023	0.026
c. Dry rubble or riprap	0.023	0.033	0.036
4. Brick			
a. Glazed	0.011	0.013	0.015
b. In cement mortar	0.012	0.015	0.018
5. Metal			
a. Smooth steel surfaces	0.011	0.012	0.014
b. Corrugated metal	0.021	0.025	0.030
6. Asphalt			
a. Smooth	0.013	0.013	
b. Rough	0.016	0.016	
7. Vegetal lining	0.030		0.500

10.13 Kartillustrasjon over Kvarrvegen og Ysteri- og Eksisvegen



Kilde: Nummeropplysningen 1881 (2018).



Kilde: Nummeropplysningen 1881 (2018).