

Henning Sigstad

## Flommodellering i HEC-RAS

En undersøkelse av nøyaktigheten til steady flow-modelleringer i HEC-RAS med to forskjellige GIS-representasjoner.

Trondheim, 15. mai 2018

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Fakultet for samfunns- og utdanningsvitenskap  
Institutt for geografi

Veileder: Jan Ketil Rød





# Summary

---

In 2011 and 2013, substantial damages caused by flooding occurred in Gudbrandsdalen, where most of the damages were the cause of flash floods in tributary rivers. The cause for both floods were attributed to heavy precipitation in the days before the events. Flash floods are presumed to become more prevalent in the future because of an increase in precipitation, a consequence of global warming. Inundation maps for several of the largest rivers in Norway are already developed by NVE (The Norwegian Water Resources and Energy Directorate), but none has been developed for the small rivers. Flash floods are more prevalent in small rivers and catchments, and because of the nature of these floods, they impose a bigger threat to human lives. Therefore, it is necessary to develop accurate flood maps in these river systems as well.

This master's thesis will discuss the accuracy of inundation maps developed in HEC-RAS, a geographic information system (GIS) designed for hydraulic modelling. The suitability of modelling small rivers with a steep catchment area in HEC-RAS are discussed and analyzed. In addition, the suitability of two different terrain representations in hydraulic modelling will be discussed: TIN (vector) and GRID (raster). Data from damages caused by the flooding event in 2013, and pictures taken after a flash flood in 2017, will be used as the basis for the discussion. The study area is Brandrudsåa in Gudbrandsdalen, a small tributary to the river Gudbrandsdalslågen.

The findings in this thesis show that HEC-RAS is suitable for modelling small, steep rivers. Though some adjustments should be considered to account for the terrain gradient. TINs are more purposeful when modelling hydraulics, at least in a terrain with high relief. GRIDs should be considered when modelling rivers in a flat terrain.



# Sammendrag

---

I Gudbrandsdalen i 2011 og 2013 var det flomhendelser med vesentlige skadeomfang, der de største skadene kom som en konsekvens av styrtflom i de små sideelvene. Under begge disse flommene var det ekstremnedbør i forkant som var årsaken. Styrtflommer er antatt å oppstå stadig hyppigere i fremtiden, på grunn av økt nedbør som følge av klimaendringer.

Flomsonkart for flere store vassdrag er allerede utviklet av NVE (Norges vassdrags- og energidirektorat), men ikke for små, bratte vassdrag. Fordi styrtflommer kommer så brått er det stor fare for menneskeliv ved slike hendelser. Små, bratte elver er mer utsatt for styrtflommer, og derfor er det nødvendig å lage gode flommodeller også for disse vassdragene.

Denne masteroppgaven vil diskutere nøyaktigheten til flomsonemodeller utviklet i HEC-RAS, et geografisk informasjonssystem (GIS) laget for modellering av hydrologiske fenomener. I oppgaven diskuteres og analyseres hvorvidt HEC-RAS er egnet til modellering av små, bratte vassdrag. I tillegg vil det være en diskusjon rundt egnetheten til to forskjellige GIS-representasjoner for bruk i hydrologiske modelleringer. Disse representasjonene er TIN (vektor) og GRID (raster). Grunnlaget for diskusjonen av nøyaktigheten til de modellerte flomsonene kommer fra to sammenligningsmetoder: skadedata fra flomhendelsene i 2013, og fotografier tatt etter en styrtflom i 2017. Studieområdet er Brandrudsåa i Gudbrandsdalen, en liten sideelv til Gudbrandsdalslågen.

Funnene gjort i oppgaven tilsier at HEC-RAS er ganske godt egnet til modellering av små vassdrag, men at noen justeringer bør vurderes for å veie opp for helningsgradienten. Videre er TIN-modeller velegnet til analyse av hydrologiske fenomener, i det minste i terreng med en viss helningsgradient. For modellering av elvesystemer i veldig flatt terreng kan også GRID vurderes.



# Forord

---

Denne masteroppgaven markerer slutten på noen fine studieår ved geografisk institutt på NTNU i Trondheim. Arbeidet med denne oppgaven har vært veldig lærerikt, og min egen faglige utvikling de siste to årene har vært stor. Prosessen har vært krevende, da mye av arbeidet som beskrives i denne oppgaven er basert på metoder jeg har lært meg de siste 6 til 7 månedene, men det er likevel en erfaring jeg ikke ville vært foruten.

En spesiell takk rettes til min veileder, Jan Ketil Rød – professor ved geografisk institutt på NTNU, for gode innspill og uvurderlig hjelp, spesielt med etablering av forskningsspørsmål og rettleiding gjennom arbeidet med oppgaven.

Takk til min samarbeidspartner under både feltarbeidet og arbeidet med GIS-programvarene, Petter Aasen. En takk rettes også til Tormod Brede for assistanse under våre feltundersøkelser.

To som har hjulpet til med faglige innspill og assistanse i denne oppgaven fortjener en stor takk: Ivar Berthling – professor ved geografisk institutt, og Knut Alfredsen – professor ved institutt for bygg- og miljøteknikk, begge på NTNU.

Jeg vil også takke Ingrid Fostervold, Heidi Hauge og Eli Skaug Rønning for korrekturlesing av oppgaven.

En takk til alle mine studiekamerater under min bachelor- og masterutdanning for gode og humørfylte stunder. Helt til slutt vil jeg rette en takk til de jeg har delt lesesal med de siste to årene, for godt humør og diskusjoner av varierende faglig kvalitet.

Henning Sigstad

Trondheim, 8. mai 2018





# Innhold

---

Summary .....	I
Sammendrag .....	III
Forord .....	V
Figurliste.....	XI
Formler og tabeller .....	XVII
Forkortelser og ordforklaringer .....	XIX
Kapittel 1 - Innledning .....	1
1.1 Klimaendringer og nedbørsøkning .....	2
1.2 Forsknings spørsmål .....	2
1.3 Flom i små vassdrag .....	3
1.4 Oppgavens relevans .....	4
Kapittel 2 - Områdebeskrivelse .....	5
2.1 Gudbrandsdalen .....	5
2.2 Brandrudsåa .....	6
Kapittel 3 - Teori .....	9
3.1 Styrtdal .....	9
3.1.1 Overflateavrenning .....	9
3.2 Lidar.....	10
3.2.1 Fordeler .....	11
3.2.2 Ulemper .....	12
3.3 Interpolering .....	12
3.3.1 Invers avstandsvektning (IDW) .....	13
3.3.2 Spline.....	14
3.3.3 Kriging .....	14
3.3.4 Naturlig nabo (natural neighbor).....	15
3.3.5 Valg av interpoleringsmetode .....	15
3.4 Digitale terrengmodeller .....	16
3.4.1 Irregulære modeller (vektor) .....	16
3.4.2 Regulære modeller (raster).....	18
3.4.3 Cellestørrelse .....	19
3.5 Hydrologisk analyse .....	19
3.5.1 Steady flow i HEC-RAS .....	19
3.5.1.1 Beregningsformler i steady flow .....	20
3.5.1.2 Begrensninger.....	22
3.5.2 NEVINA.....	23
Kapittel 4 - Metode .....	25
4.1 Datainnsamling .....	25
4.2 Utvikling av terrengmodell.....	26
4.2.1 Lidar og LAS-filer.....	26
4.2.2 Oppløsning .....	27
4.2.3 Generering av DTM .....	28
4.2.3.1 LAS dataset to raster .....	28

4.2.3.2	Raster to TIN .....	29
4.2.3.3	Fill .....	29
4.3	HEC-GeoRAS .....	30
4.3.1	RAS-lag .....	30
4.3.2	Elvenettverket (stream centerline) .....	31
4.3.3	Elvebanker (banks) og strømningslinjer (flow path centerlines) .....	32
4.3.4	Tverrsnitt (cross-sectional cut lines) .....	34
4.3.4.1	Energitapskoeffisienter .....	35
4.3.4.2	Tegning og attribuering av tverrsnitt .....	36
4.3.5	Blokkeringer (blocked obstructions) .....	37
4.3.6	Arealbruk (land use) .....	37
4.3.6.1	Mannings n-verdier .....	38
4.3.7	Andre lag og eksport til HEC-RAS .....	39
4.4	HEC-RAS .....	40
4.4.1	Bruer og stikkrenner .....	40
4.4.1.1	Plassering av tverrsnitt .....	41
4.4.1.2	Kontraksjons- og ekspansjonstap .....	43
4.4.1.3	Modellering .....	43
4.4.2	Steady flow .....	46
4.4.3	Flomsonekartlegging .....	47
Kapittel 5	- Resultater .....	49
5.1	Skade- og bildepunkter .....	49
5.2	Område 1 .....	51
5.2.1	TIN .....	53
5.2.2	GRID .....	55
5.3	Område 2 .....	57
5.3.1	TIN .....	58
5.3.2	GRID .....	60
5.4	Område 3 .....	62
5.4.1	TIN .....	63
5.4.2	GRID .....	65
5.5	Område 4 .....	67
5.5.1	TIN .....	70
5.5.2	GRID .....	71
5.6	Område 5 .....	73
5.6.1	TIN .....	76
5.6.2	GRID .....	78
Kapittel 6	- Diskusjon .....	81
6.1	Vannføring .....	83
6.2	Problemer og utfordringer med HEC-programvaren .....	85
6.2.1	Tverrsnitt .....	85
6.2.2	Bruer og stikkrenner .....	86
6.2.3	Stasjonering av elvenettverket og tverrsnittene .....	87
6.2.4	Andre utfordringer .....	88
6.3	Terrengmodell .....	89
6.4	Sammenligningsmetode .....	90
6.5	Forslag til videre arbeid .....	91
Kapittel 7	- Konklusjon .....	93
Referanser	.....	95

Vedlegg A - Mannings n for elvekanaler og -sletter .....	a
Vedlegg B - Mannings n for stikkrenner.....	c
Vedlegg C - Energitapskoeffisienter ved inngang .....	d
Vedlegg D - Rapport fra NEVINA .....	e
Vedlegg E - Rapport fra NEVINA 2 .....	g
Vedlegg F - Sammenligning av 2,8 og 4 m <sup>3</sup> /s.....	i
Vedlegg G - Sammenligning med og uten blokkering.....	j



# Figurliste

---

Figur 1-1: Skader på bilvei som følge av at Trilla, sideelv til Brandrudsåa, har gravd seg frem nye veier rundt ei stikkrenne under en styrtflom (Foto: Henning Sigstad, juli 2017).....	4
Figur 2-1: Gudbrandsdalen (stiplede linjer) og Brandrudsåa (diamantmarkør) i sør-Norge (Kartverket, 2018b). .....	5
Figur 2-2: Nedbørsfeltet markert i blå strek, med en røff inndeling av hovedterrengtypene 1, 2 og 3, adskilt med stiplet linje. Nedbørsfeltet er laget i NEVINA. ....	6
Figur 3-1: Luftbårne Lidar-målinger måler ikke kun x, y og z på bakken, men også rotering og helning på flyet (eget arbeid, etter MESH, 2008). ....	10
Figur 3-2: Retursignaler fra Lidar-målinger som treffer et tre. I dette eksempelet returnerer treet 3 retursignaler før siste retursignal på bakken (Deems et al., 2013). ....	11
Figur 3-3: Interpolering av høydedata. Bildet til venstre viser punkter med høydeverdier, bildet til høyre viser den interpolerte terrengmodellen (Esri, 2016c). ....	13
Figur 3-4: Vekting av punkter i IDW. Bildet til venstre viser vekting ut fra interpoleringspunktet, der rød betyr mest vekting. Bildet til høyre forklarer funksjonen p (Esri, 2017b).....	13
Figur 3-5: Eksempel på Voronoi-polygon (gult polygon) rundt interpoleringspunktet (rød stjerne) i naturlig nabo-interpolering (Esri, 2017d).....	15
Figur 3-6: DTM-modeller av samme område, vektor til venstre og raster til høyre (Hengl og Evans, 2009).....	16
Figur 3-7: TIN-struktur basert på Delaunay-triangulering. Massepunktene til venstre og TIN-strukturen til høyre. Figuren er hentet fra Rød (2015) side 184.....	17
Figur 3-8: Definisjoner for forskjellige parametre i energilikningen (Brunner, 2016).....	21
Figur 3-9: Inndeling av tverrsnitt for beregning av total transporteringssevne (Brunner, 2016). .....	22
Figur 3-10: Kvalitetsvurdering av lavvannsmålinger brukt i NEVINA (Engeland et al., 2008). .....	23
Figur 4-1: Arbeidsflyt i ArcMap (i grønt), HEC-GeoRAS (i rødt) og HEC-RAS (i blått). Nummeret øverst til venstre i hvert rektangel korresponderer til nummeret til delkapitlet arbeidsmetoden blir forklart. ....	25
Figur 4-2: Til venstre: LAS-filene lagt på den resulterende DTM-en. Til høyre: antall punkter i LAS-datasettet hentet fra ArcCatalog. ....	27
Figur 4-3: Arbeidsflyten i LAS dataset to raster. ....	28
Figur 4-4: Arbeidsflyten i raster to TIN. ....	29
Figur 4-5: Fill kan både fylle synkehull og fjerne topper som ikke følger trender i terrenget (Esri, 2017a). ....	29
Figur 4-6: Eksempel på «kryss» i HEC-RAS, der grønn, rød og gul elv er hver sine linjer, men er koblet sammen. Dette til tross for at grønn elv blir ansett som sideelv til rød og gul. ....	31
Figur 4-7: Banklinjer i rødt, elvelinja i blått, tverrsnitt i grønt, strømningslinjer i gult. ....	33

Figur 4-8: Eksempel på plassering av strømningslinjer hentet fra Ackerman (2012) side 8-11. .....	33
Figur 4-9: Eksempel på oppsett av tverrsnitt, opprinnelig fra Brunner (2016) side 3-6. ....	34
Figur 4-10: Stasjoner (svarte firkanter) og bankstasjoner (røde firkanter) langs høydeprofilen for et tverrsnitt. ....	35
Figur 4-11: Meny for attribuering av tverrsnitt. ....	36
Figur 4-12: Arealbrukskartet bygget på AR50. ....	37
Figur 4-13: Utsnitt av attributt Tabellen til arealbruksdataene. ARTYPE til venstre, og LandUse er lagt til som ny kolonne til høyre. ....	37
Figur 4-14: Tabellene «LUManning» til venstre og «Manning» til høyre. ....	39
Figur 4-15: Geometriske data etter import. Tallene ved tverrsnittene (i grønt) angir river station. ....	40
Figur 4-16: Plassering av tverrsnitt 1, 2, 3 og 4 rundt strukturen. Modifisering av figur hentet fra CivilGEO (2018). ....	41
Figur 4-17: Plassering av tverrsnitt rundt ei stikkrenne i Brandrudsåa. Tallene korresponderer til nummereringen i Figur 4-16. ....	43
Figur 4-18: Informasjon om brudekket angitt for den første stikkrenna. Distance, width, og upstream/ downstream station og high chord var de eneste verdiene som ble endret på fra en stikkrenne til en annen. ....	44
Figur 4-19: Det er også mulig å legge inn flere enn ett rør. Illustrasjon av de modellerte stikkrennene med redigeringsverktøyet for stikkrenner til høyre. Profilen for siden oppstrøms øverst og nedstrøms nederst. Legg merke til at det grå feltet med rød linje øverst bestemmes av brudekket jeg har angitt informasjon om tidligere. ....	45
Figur 4-20: Stikkrennene (grå firkanter) lagt til i de geometriske dataene. ....	46
Figur 4-21: Oppsett av lag til import i HEC-GeoRAS. ....	47
Figur 4-22: Den gule polygonen (grensepolygonen) viser begrensningen for flomsonkartleggingen. Her ser en at den følger ytterpunktene til tverrsnittene (grønne linjer). Røde punkter er bankpunkter, mens blå og svarte punkter holder informasjon om strømningshastighet. ....	47
Figur 4-23: Fjerning av stasjoner til høyre sett nedstrøms. Opprinnelig tverrsnitt til venstre og kuttet tverrsnitt til høyre. Laveste punkt ligger utenfor elvekanalen i tverrsnittet til venstre. .	48
Figur 4-24: Tydelige resultater etter kutting av tverrsnitt (til høyre). ....	48
Figur 5-1: Flomsoner i Brandrudsåa ved 100-årsflom laget i HEC-RAS med TIN som terrengmodell. ....	49
Figur 5-2: Flomsoner i Brandrudsåa ved 100-årsflom laget i HEC-RAS med GRID som terrengmodell. ....	49
Figur 5-3: Kart over skade- og bildepunkter i den digitaliserte delen av Brandrudsåa. Kartet viser også de nummererte områdene som presenteres i dette kapitlet. Den lange stikkrenna under nye E6 vises i rødt med svart skravur nederst i elveløpet. ....	50
Figur 5-4: (Bilde 1) Brandrudsåa sett oppstrøms. Bærer preg av tidligere høy vannstand (Foto: Henning Sigstad, juli 2017). ....	51

Figur 5-5: (Bilde 2) Brandrudsåa sett nedstrøms. Her har det tilsynelatende vært relativt liten vannstand (Foto: Henning Sigstad, juli 2017).....	52
Figur 5-6: Mulig spor av plastringen etter flommen i 2013 nedenfor skadepunktet (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).....	52
Figur 5-7: Vannstand ved 2,8 m <sup>3</sup> /s vannføring med TIN som terrengmodell. Røde punkter angir hvor bildene er tatt, gult punkt er skadepunktet (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017). .....	53
Figur 5-8: Vannstand ved 6 m <sup>3</sup> /s vannføring med TIN som terrengmodell (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).....	53
Figur 5-9: Sammenligning av de to TIN-modellene. Vannstand ved 2,8 m <sup>3</sup> /s i blått lagt oppå 6 m <sup>3</sup> /s i rødt (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017). ....	54
Figur 5-10: Vannstand ved 2,8 m <sup>3</sup> /s vannføring med GRID som terrengmodell. Røde punkter angir hvor bildene er tatt, gult punkt er skadepunktet (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017). .....	55
Figur 5-11: Vannstand ved 6 m <sup>3</sup> /s vannføring med GRID som terrengmodell (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).....	55
Figur 5-12: Sammenligning av de to GRID-modellene. Vannstand ved 2,8 m <sup>3</sup> /s i blått lagt oppå 6 m <sup>3</sup> /s i rødt (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017). ....	56
Figur 5-13: Detalj av område 1 nedstrøms for skadepunktet. GRID-modellen i blått lagt oppå TIN-modellen i rødt ved vannføring på 2,8 m <sup>3</sup> /s (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017). ....	56
Figur 5-14: (Bilde 1) Brandrudsåa sett oppstrøms. Bærer tydelig preg av tidligere høy vannstand her også (Foto: Henning Sigstad, juli 2017) .....	57
Figur 5-15: (Bilde 2) Også preg av tidligere høy vannføring nedstrøms (Foto: Henning Sigstad, juli 2017). ....	57
Figur 5-16: Vannstand ved 2,8 m <sup>3</sup> /s vannføring med TIN som terrengmodell. Røde punkter angir hvor bildene er tatt (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017). ....	58
Figur 5-17: Vannstand ved 6 m <sup>3</sup> /s vannføring med TIN som terrengmodell (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).....	58
Figur 5-18: Sammenligning av de to TIN-modellene. Vannstand ved 2,8 m <sup>3</sup> /s i blått lagt oppå 6 m <sup>3</sup> /s i rødt (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017). ....	59
Figur 5-19: Vannstand ved 2,8 m <sup>3</sup> /s vannføring med GRID som terrengmodell. Røde punkter angir hvor bildene er tatt (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017). ....	60
Figur 5-20: Vannstand ved 6 m <sup>3</sup> /s vannføring med GRID som terrengmodell (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).....	60
Figur 5-21: Sammenligning av de to GRID-modellene. Vannstand ved 2,8 m <sup>3</sup> /s i blått lagt oppå 6 m <sup>3</sup> /s i rødt (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017). ....	61
Figur 5-22: Sammenligning av modellene ved vannføring på 2,8 m <sup>3</sup> /s. GRID-modellen i blått lagt oppå TIN-modellen i rødt (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).....	61
Figur 5-23: Område 3 med nummerering av skadepunkter. Kongsvegen (gamle E6) nede til venstre (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017). ....	62
Figur 5-24: Mulig spor etter utvasking nedenfor øverste skadepunkt (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).....	62

Figur 5-25: Vannstand ved 2,8 m <sup>3</sup> /s vannføring med TIN som terrengmodell. Gule punkter er skadepunkter (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017). .....	63
Figur 5-26: Vannstand ved 6 m <sup>3</sup> /s vannføring med TIN som terrengmodell (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017). .....	64
Figur 5-27: Sammenligning av de to TIN-modellene. Vannstand ved 2,8 m <sup>3</sup> /s i blått lagt oppå 6 m <sup>3</sup> /s i rødt (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017). .....	64
Figur 5-28: Vannstand ved 2,8 m <sup>3</sup> /s vannføring med GRID som terrengmodell. Gule punkter er skadepunkter (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017). .....	65
Figur 5-29: Vannstand ved 6 m <sup>3</sup> /s vannføring med GRID som terrengmodell (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017). .....	66
Figur 5-30: Sammenligning av modellene ved vannføring på 2,8 m <sup>3</sup> /s. GRID-modellen i blått lagt oppå TIN-modellen i rødt (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017). .....	66
Figur 5-31: (Bilde 1) Brandrudsåa sett oppstrøms. Tydelig synlig bevis på tidligere høy vannføring. Flomveien fra Trilla i Figur 5-32 kommer inn nederst i bildet (Foto: Henning Sigstad, juli 2017). .....	67
Figur 5-32: (Bilde 2) Flomvei dannet av vann som har rent over fra Trilla til Brandrudsåa. Gropen som vises i Figur 5-34 er øverst til venstre i bildet (Foto: Henning Sigstad, juli 2017). .....	68
Figur 5-33: (Bilde 3) Brandrudsåa nedstrøms. Noen spor av høy vannføring (Foto: Henning Sigstad, juli 2017). .....	69
Figur 5-34: Utgravinger gjort av Trilla rundt ei stikkrenne under en styrtflom (Foto: Petter Aasen, juli 2017). .....	69
Figur 5-35: Vannstand ved 2,8 m <sup>3</sup> /s vannføring med TIN som terrengmodell. Røde punkter angir hvor bildene er tatt, oransje punkter er skadepunkter (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017). .....	70
Figur 5-36: Vannstand ved 6 m <sup>3</sup> /s vannføring med TIN som terrengmodell (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017). .....	70
Figur 5-37: Sammenligning av de to TIN-modellene. Vannstand ved 2,8 m <sup>3</sup> /s i blått lagt oppå 6 m <sup>3</sup> /s i rødt (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017). .....	71
Figur 5-38: Vannstand ved 2,8 m <sup>3</sup> /s vannføring med GRID som terrengmodell. Røde punkter angir hvor bildene er tatt, oransje punkter er skadepunkter (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017). .....	71
Figur 5-39: Vannstand ved 6 m <sup>3</sup> /s vannføring med GRID som terrengmodell (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017). .....	72
Figur 5-40: Sammenligning av de to GRID-modellene. Vannstand ved 2,8 m <sup>3</sup> /s i blått lagt oppå 6 m <sup>3</sup> /s i rødt (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017). .....	72
Figur 5-41: Sammenligning av modellene ved vannføring på 2,8 m <sup>3</sup> /s. GRID-modellen i blått lagt oppå TIN-modellen i rødt (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017). .....	73
Figur 5-42: (1) Bilde tatt nedstrøms fra brua vist i bilde 3. Inngangen til stikkrenna med doble løp under nye E6 vises. Gitteret som skal hindre større sedimenter er tydelig skadet etter flommen. Eksisvegen ses på baksiden av inngangen. (2) Bilde tatt oppstrøms fra brua i bilde 3. Lite tegn til flomskader. (3) Bilde av brua i Ysterivegen. (4) Tydelige tegn på at elva har	



oversvømt området rundt Eksisvegen nedstrøms for inngangen til stikkrenna under nye E6. Alle foto av Henning Sigstad, juli 2017. ....	74
Figur 5-43: (Bilde 5) Bilde tatt under flommen i 2017 av området (Foto: Einar Almehagen, juli 2017). ....	75
Figur 5-44: Beliggenheten til Eksisvegen og Ysterivegen i området (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017). ....	75
Figur 5-45: Vannstand ved 2,8 m <sup>3</sup> /s vannføring med TIN som terrengmodell. Røde punkter angir hvor bildene er tatt, oransje punkt er antatt plassering av bilde 5, gult punkt er skadepunktet (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017). ....	76
Figur 5-46: Vannstand ved 6 m <sup>3</sup> /s vannføring med TIN som terrengmodell (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017). ....	76
Figur 5-47: Sammenligning av de to TIN-modellene. Vannstand ved 2,8 m <sup>3</sup> /s i blått lagt oppå 6 m <sup>3</sup> /s i rødt (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017). ....	77
Figur 5-48: Vannstand ved 2,8 m <sup>3</sup> /s vannføring med GRID som terrengmodell. Røde punkter angir hvor bildene er tatt, oransje punkt er antatt plassering av bilde 5, gult punkt er skadepunktet (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017). ....	78
Figur 5-49: Vannstand ved 6 m <sup>3</sup> /s vannføring med GRID som terrengmodell (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017). ....	78
Figur 5-50: Sammenligning av de to GRID-modellene. Vannstand ved 2,8 m <sup>3</sup> /s i blått lagt oppå 6 m <sup>3</sup> /s i rødt (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017). ....	79
Figur 5-51: Sammenligning av modellene ved vannføring på 2,8 m <sup>3</sup> /s. GRID-modellen i blått lagt oppå TIN-modellen i rødt (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017). ....	79
Figur 6-1: (Venstre) Stikkrenne i grått med to tilgrensende tverrsnitt. (Høyre) Tverrprofil av samme struktur sett fra opp- og nedstrøms tverrsnitt. ....	86
Figur 6-2: Attributt Tabellen for elvenettverket. «FromSta» og «ToSta» helt til høyre. ....	87
Figur 6-3: Utdrag av attributt Tabellen for tverrsnitt. Eksempel på ekstreme verdier for distanse mellom tverrsnitt markert i rød, stiplet linje. ....	88
Figur 6-4: Detalj fra område 5 med GRID til venstre og TIN til høyre. ....	89



# Formler og tabeller

---

Formel 3-1: Energilikningen .....	20
Formel 3-2: Beregning av total transporteringssevne.....	21
Formel 4-1: McCullaghs formel.....	27
Formel 4-2: McCullaghs formel utfylt. ....	28

---

Tabell 4-1: Oversikt over Mannings n-verdier for hver arealbrukstype med Chows beskrivelse som referanse.....	38
Tabell 4-2: Flomtyper med tilhørende verdier brukt i analysen.....	47
Tabell 6-1: Kort vurdering av TIN- og GRID-modellene for hvert område. ....	81



# Forkortelser og ordforklaringer

---

<b>AR50</b>	Arealressurskart
<b>DTM</b>	Digital terrengmodell
<b>Esri</b>	Environmental Systems Research Institute
<b>GIS</b>	Geografiske informasjonssystemer
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>HEC-RAS</b>	Hydrologic Engineering Center's River Analysis System
<b>IDW</b>	Inverse distance weighting
<b>LAS</b>	Log ASCII Standard
<b>Lidar</b>	Light detection and ranging
<b>NEVINA</b>	Nedbørfelt- og vannføringsindeksanalyse
<b>NIBIO</b>	Norsk Institutt for Bioøkonomi
<b>NN 1954</b>	Normal null av 1954 (vertikalt koordinatsystem)
<b>NVDB</b>	Nasjonal vegdatabank
<b>NVE</b>	Norges Vassdrags- og Energidirektorat
<b>SFKB</b>	Sentral felles kartdatabase
<b>TIN</b>	Triangulert irregulært nettverk
<b>USACE</b>	US Army Corps of Engineers
<b>UTM</b>	Universal Transverse Mercator
<b>WGS 1984</b>	World Geodetic System 1984

**ArcMap** Programvare for behandling og redigering av GIS-data.

**Attribuering** Tildeling av egenskaper til RAS-lagene.

**HEC-programvaren** Består av HEC-RAS og HEC-GeoRAS. HEC-RAS er et selvstendig program, mens HEC-GeoRAS er en utvidelse til ArcMap.

**RAS-lag** De geometriske dataene som digitaliseres i HEC-GeoRAS.

**Stasjon** Punkter som brukes i HEC-RAS til å identifisere hvor objekter og terrengforandringer ligger i tverrsnitt.

**Stasjonering** Den automatiske beregningen av plasseringen til stasjoner når tverrsnittene attribueres.

## Kapittel 1 - Innledning

---

To store flommer rammet Gudbrandsdalen i juni 2011 og mai 2013. Mye nedbør førte først til flom i store deler av Sør-Norge i juni 2011. Under denne hendelsen ble det på under ett døgn målt mellom 60 og 110 mm nedbør ved flere målestasjoner i Trøndelag, Oppland og Hedmark. Gjennom simuleringer gjort i ettertid er det antatt at nedbørsmengden var enda høyere flere steder. Nedbørshendelsen førte til styrtflom i flere små vassdrag, da det flere steder ble registrert vannføring over 100-årsflom. Det ble i forkant ikke sendt ut varsel om storflom. Dette fordi NVE (Norges vassdrags- og energidirektorat), som har ansvar for flomvarslingen, ikke klarte å forutse en så ekstrem vannføring i de verst rammede vassdragene, til tross for at de opererer med en 24-timers overvåknings- og varslingstjeneste (Vatne, 2013). I Gudbrandsdalen hadde stor nedbør i mai 2011 fylt opp mark- og grunnvannsmagasiner, noe som videre førte til flom fra 6. til 12. juni. Flomtoppen i hovedvassdraget var mellom 11. og 12. juni, mens det i sidevassdragene og dalsidene kun varte fra kvelden den 10. til morgenen den 11. juni. I hovedsak var det flommen fra sidevassdragene som førte med seg de største skadene på infrastruktur og bygningsmasse. Den nordlige delen av Gudbrandsdalen led av mest nedbør og skader (Olsen et al., 2015).

En ny flomhendelse traff Gudbrandsdalen i mai 2013, men da med høyest nedbørintensitet og skadeomfang i den sørlige delen av dalen. Her ble det påført store skader på veier, jernbane og bygninger i løpet av bare noen få dager. I mai 2013 ble det målt store mengder nedbør, men ikke ekstremnedbør. I Gudbrandsdalen ble det målt størst nedbør mellom 21. og 22. mai. Flommen ble likevel karakterisert som en ekstremhendelse siden den førte til mye vann på avveie, med store skader på infrastruktur og bebyggelse (Olsen et al., 2015). I en rapport for NVE skriver Olsen et al. (2015, side 10):

*Skadene som ble påført jernbanens infrastruktur var svært omfattende. Det var skred, utglidninger, utvaskinger og ødelagte elektroniske installasjoner. Etter hendelsen måtte jernbanen repareres på 300 punkter, noe som hadde en prislapp på omkring 300 millioner kroner.*

Dette viser tydelig at flommer gjerne fører til store materielle skader. I juli 2017 var jeg selv vitne til skadeomfanget slike flommer kan påføre, når jeg gjorde mine feltundersøkelser i studieområdet Brandrudsåa, eksemplifisert i Figur 1-1. I området rundt Brandrudsåa hadde det

kun noen dager i forveien kommet en estimert mengde på mellom 60 og 100 mm nedbør (Senorge.no, 2018).

## 1.1 Klimaendringer og nedbørsøkning

I fremtiden er det på grunn av høyere temperaturer som en følge av klimaendringer, forventet at det vil komme mer nedbør. Sammenlignet med år 1900 regner det nesten 20 % mer i Norge i dag, der den største økningen har kommet om vinteren og på Vestlandet. Klimaforskere er rimelig sikre på at det kommer til å regne enda mer i Norge fremover. Det regnes med en økning på mellom 5 og 30 % frem til år 2100. Basert på flere klimamodeller er det kommet et anslag på totalt 18 % økning på landsbasis. Økningen av nedbør på høsten kan bli størst langs kysten, mens det om vinteren er forventet å bli en stor økning i deler av Østlandet og indre Trøndelag (Amundsen, 2012).

Et annet funn gjort i denne forskningen er at det mest sannsynlig vil komme mer ekstremnedbør over hele landet. Likevel er det ikke sikkert at det vil oppstå hyppigere flommer som en konsekvens av dette, fordi mer av nedbøren om vinteren vil komme som regn, ikke snø. Store deler av nedbøren vil dermed renne bort i løpet av vinteren og ikke lagres i form av snø som smelter bort om våren. Dermed forventes det mer vann i bekker og elver om vinteren, og mindre om sommeren. Antall ekstremnedbørshendelser vil sannsynligvis stige. Grunnen er at varmere luft inneholder mer fuktighet, og når atmosfæren slipper alt vannet vil det komme kraftig regnvær, likt det de opplever i Sør-Europa, noe som igjen øker faren for kraftige regnskyll og styrtflom. Det regnes også med at fordampingen av vann fra bakken vil øke slik at mindre vann vil nå frem til vassdragene. Som en konsekvens vil de da holde mindre vann i sommermånedene sammenlignet med i dag (Amundsen, 2012).

## 1.2 Forskningsspørsmål

I denne masteroppgaven skal jeg lage flomveismodeller med geografiske informasjonssystemer (GIS) for å se hvor vannet tar veien når det havner på avveie. Med det menes der de nye veiene vannet går under flomhendelser. For å gjøre dette vil jeg bruke programmet HEC-RAS, der digitalisering skjer i ArcMap med tillegget HEC-GeoRAS. Studieområdet mitt er Brandrudsåa i Sør-Fron kommune i Oppland, og dette vassdraget har opplevd flere flommer de siste (Olsen et al., 2015). Jeg skal forsøke å finne ut hvor nøyaktige modellene er ved å sammenligne mine resultater med skadedata utarbeidet av Oppland



fylkeskommune, gjennom å se i hvor stor grad skadepunktene og flommodellingene sammenfaller. Jeg vil også sammenligne egnetheten til GRID og TIN med hensyn til flommodelleringer.

Jeg vil dermed forsøke å svare på følgende forskningsspørsmål:

- *Hvor egnet er HEC-RAS til flommodellering av små bratte vassdrag?*
- *Hvilken GIS-representasjon passer best til flommodellering i HEC-RAS?*

Begge spørsmålene tar for seg problemstillinger der nøyaktighet spiller en vesentlig rolle. Flommodelleringer har i utgangspunktet en del usikkerhet knyttet til seg, og dette inkluderer også flommodeller utviklet av NVE. Usikkerheten kommer ifra nøyaktigheten til de hydrologiske dataene, flomberegningene, vannlinjeberegningene og terrengmodellen. Usikkerheten er derfor vanskelig å kvantifisere, spesielt for flommene med langt gjentaksintervall (100-, 200-, og 500-årsflom), der det kan oppstå store avvik i estimert vannføring (Rød et al., 2013). En av grunnene er at i Norge er data for store flommer basert på måleserier for større vassdrag. Måleseriene går gjerne over hundre år tilbake i tid, men det er likevel en del statistisk usikkerhet knyttet til dem. Valg av fordelingsfunksjon vil påvirke resultatene, og ulike fordelingsfunksjoner estimerer ulike flomstørrelser. Styrftlom i små vassdrag er spesielt vanskelig, da det eksisterer svært få lange måleserier fra denne typen vassdrag (Vatne, 2013). Siden det er knyttet så stor usikkerhet til flommodelleringer vil jeg i denne oppgaven diskutere og drøfte resultatene mine, fremfor å presentere en ren empirisk analyse.

### 1.3 Flom i små vassdrag

Ekstremflommer i store vassdrag gjør som regel mest skade målt i antall kroner, men siden de blir varslet i god tid i forveien utgjør de ikke en like stor fare for menneskeliv som styrftlommer. Styrftlommer, på sin side, rammer gjerne små vassdrag som Brandrudsåa spesielt, og er vanskelig å varsle siden de kommer så plutselig. Dette er fordi nedbørsfeltene deres er små, som sammen med et bratt terreng fører til en kort hydrologisk responstid. De store vassdragene har et stort nedbørsfelt, som betyr at styrftregn kun rammer en liten del av feltet. Styrftlommer oppstår av kortvarige, intense nedbørshendelser og kjennetegnes ved en uvanlig rask stigning i vannføring, der den ofte blir vesentlig høyere enn ved flommer med andre årsakssammenhenger. I tillegg vil styrftregn ofte utløse jordskred som tilfører sedimenter til elva og dermed ytterligere forsterker skadeeffekten av styrftlommer. En videre

konsekvens av økt sedimenttransport i elva kan være redusert kapasitet i stikkrenner, siden sedimenter kan avsettes i forkant av og inne i stikkrennene. Resultatet er at vannet må finne nye veier rundt stikkrennene, noe som fører til økt erosjon og skadeomfang (Vatne, 2013).



*Figur 1-1: Skader på bilvei som følge av at Trilla, sideelv til Brandrudsåa, har gravd seg frem nye veier rundt ei stikkrenne under en styrtflom (Foto: Henning Sigstad, juli 2017)*

## 1.4 Oppgavens relevans

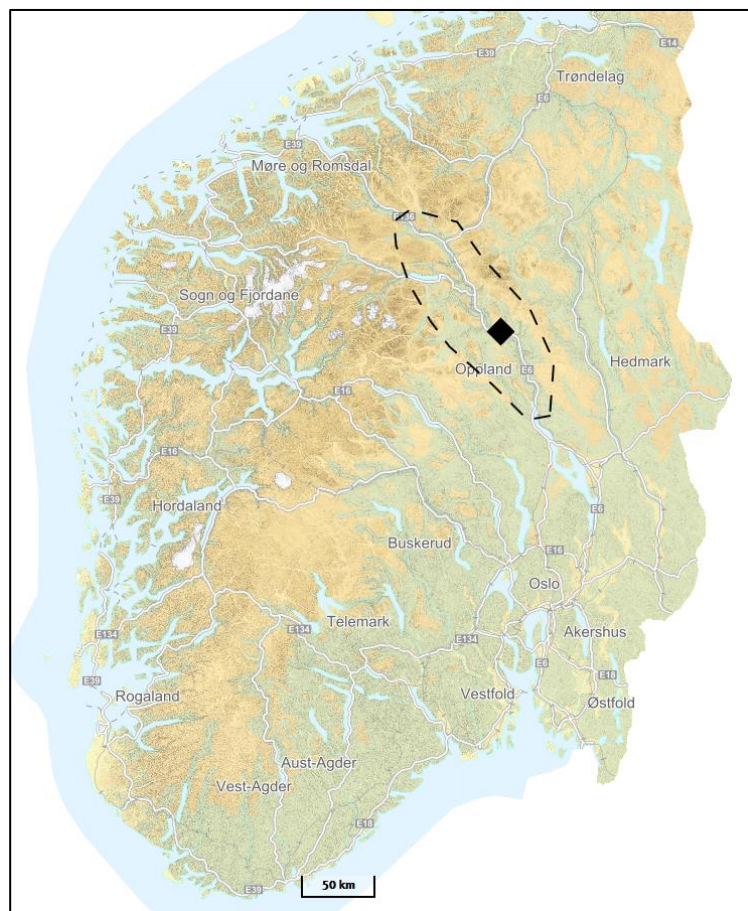
NVE har allerede laget flomsonekart for det de betegner som vassdrag med størst skadepotensial (NVE, 2008). Flomsonekartene er i hovedsak utarbeidet for større elver der det er store elvesletter og bebyggelse. Bratte sidevassdrag er ikke kartlagt, men disse vassdragene er også utsatt for flom, spesielt ved intense nedbørshendelser. I tillegg er kommuner som enda ikke er kartlagt flomutsatte. Frem til 2013 hadde NVE utført flomsonekartlegging i 131 av 428 kommuner i Norge. En ikke-kartlagt kommune som har opplevd flom er Åfjord i Trøndelag, hvor Arnevikelva i vinteren 2006 hadde en styrtflom som førte til store materielle skader og tap av et menneskeliv (Rød et al., 2013; Vatne, 2013). Styrtflommer er meget alvorlige hendelser, og flommene i 2011 og 2013 kan virke som et forvarsel for en økt flomfare i fremtiden. Med det skadepotensialet små vassdrag har i slike scenarier, er det enkelt å argumentere for behovet for å utvikle gode og nøyaktige flommodelleringer også i denne typen vassdrag.

## Kapittel 2 - Områdebeskrivelse

### 2.1 Gudbrandsdalen

Gudbrandsdalen er et dalføre som er ca. 200 km langt i Oppland fylke. Dalen går fra Lesjaskogvatnet på 611 moh. til Mjøsa på 120 til 123 moh. Gjennom hele dalen renner elva Gudbrandsdalslågen (heretter kalt Lågen). Med sidedalene Gausdal og Ottadalen er innbyggertallet ca. 71 000 innbyggere over et areal på 15 340 km<sup>2</sup>, der 567 km<sup>2</sup> er vann, ca. 447 km<sup>2</sup> er dyrket mark og ca. 2540 km<sup>2</sup> er produktiv skog (Thorsnæs, 2017).

Dalen er formet av breer og elver, og i hovedtrekk er dalbunnen vid med bratte dalsider. Øverst er det store sandlag dekket med furuskog, avsetninger av en bredemt sjø som lå her under slutten av istiden. Rundt de nordlige delene av Gudbrandsdalen ligger fjellområdene Jotunheimen, Dovrefjell og Rondane, alle med topper over 2000 moh (Thorsnæs, 2017).



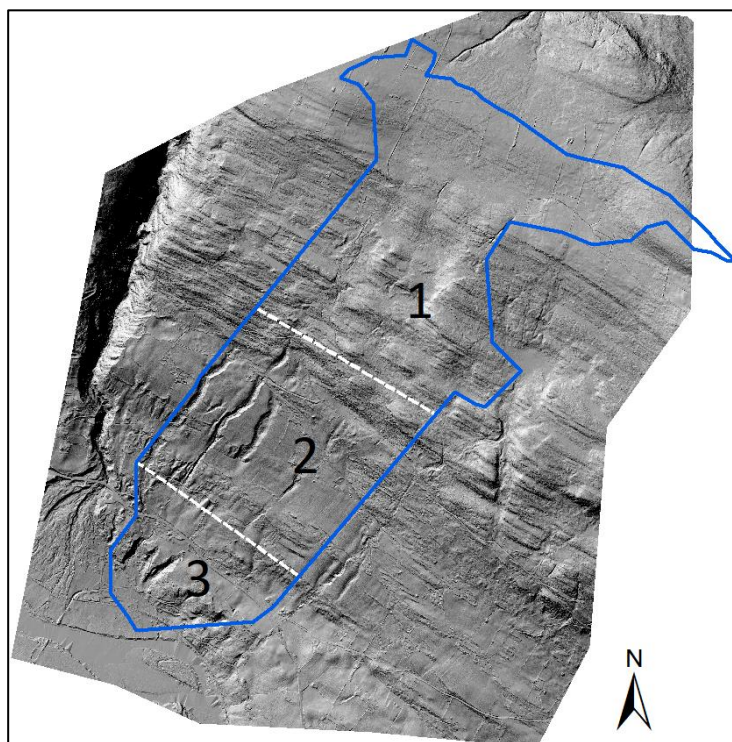
Figur 2-1: Gudbrandsdalen (stiplede linjer) og Brandrudsåa (diamantmarkør) i sør-Norge (Kartverket, 2018b).

## 2.2 Brandrudsåa

Studieområdet Brandrudsåa ligger i Sør-Fron kommune, mellom tettstedene Hundorp og Harpefoss. Nedbørsfeltet er på ca. 6 km<sup>2</sup> med en elvelengde på litt over 4 km, og betraktes derfor som et lite vassdrag av NVE (Midttømme et al., 2011). Fylkesvei 407 krysser Brandrudsåa på tre steder. I nedre del krysses vassdraget av fylkesvei 312 (gamle E6), nye E6, fylkesvei 403 og jernbanen. Brandrudsåa renner gjennom et gjennomgående bratt terreng som kan deles inn i tre hoveddeler (jmfør Figur 2-2):

1. Øverste del av vassdraget renner gjennom et relativt bratt terreng preget av ganske tett barskog. Denne delen har en gjennomsnittlig helningsgradient på ca. 10 %.
2. Midtre del preges av en bratt gradient der en høy andel av arealbruket er til jordbruk. Her er gjennomsnittlig helningsgradient på ca. 18 %.
3. Nedre del av vassdraget er der dalbunnen begynner å flate seg ut og er også preget mer av jordbruk og menneskelige inngrep. Dette området har en gjennomsnittlig helningsgradient på ca. 11 %.

Helt nederst i dalen, rett før bekken treffer sitt utløp i Lågen, ligger snittgradienten på ca. 5 %. Hele studieområdet har en gjennomsnittlig helning på ca. 12 %.



Figur 2-2: Nedbørsfeltet markert i blå strek, med en røff inndeling av hovedterrengtypene 1, 2 og 3, adskilt med stiplede linje. Nedbørsfeltet er laget i NEVINA.

Kombinasjonen av bratt terreng og en stor andel jordbruk fører til at risikoen for overflateavrenning og jorderosjon i dette området er stor. Jordbruksområder betyr lite vegetasjon, og vegetasjon er med på å binde jorda og forsinker vannets reise fram til elvekanalen (El Kateb et al., 2013). I tillegg har moderne driftsformer videre økt avrenningen fra jordbruket, siden planering og lukking av bekker gjør at naturlige hindre som søkk og kantvegetasjon fjernes. Tunge landbruksmaskiner pakker jorden tettere og vil videre øke risikoen for overflateavrenning (Olerud, 2015).



---

## Kapittel 3 - Teori

---

### 3.1 Styrtdflom

Styrtdflommer er vanligvis klassifisert som flommer som oppstår et sted innen få timer etter den utløsende hendelsen: ofte korte og intense nedbørshendelser, i hovedsak konvektiv nedbør som oppstår lokalt. Det er intet klart skille i defineringen mellom flommer og styrtdflommer, men man sier at styrtdflommer er korte og plutselige. Styrtdflommer oppstår som regel i nedbørsfelt på mindre enn 1000 km<sup>2</sup>, med en hydrologisk responstid på noen få timer. Responstiden påvirkes av størrelsen på nedbørsfeltet og graden av overflateavrenning i dette området (Marchi et al., 2010). Mange byer og tettsteder ligger ved elver og utløp hvis nedbørsfelt har en kort hydrologisk responstid, blant annet på grunn av fjellterreng lenger opp i elveløpet, samt mye av landdekket i byer er impermeabelt for vann, for eksempel asfalt, betong og hustak (Georgakakos, 1986).

Styrtdflommer havner høyt på listen over mest skadelige naturhendelser både når det kommer til antall mennesker som berøres av dette globalt, og antall dødsfall. Mellom 1950 og 2006 sto styrtdflommer for 40 % av flomrelaterte tap i Europa. Skadepotensialet for styrtdflommer er økende i mange regioner på grunn av den sosiale og økonomiske utviklingen som krever mer bruk av landområder. Videre peker en del forskning til økende nedbør på regional og global skala som en konsekvens av global oppvarming. Med hensyn til dette forventes det at styrtdflommer vil øke i frekvens og alvorlighetsgrad i mange områder (Marchi et al., 2010).

#### 3.1.1 Overflateavrenning

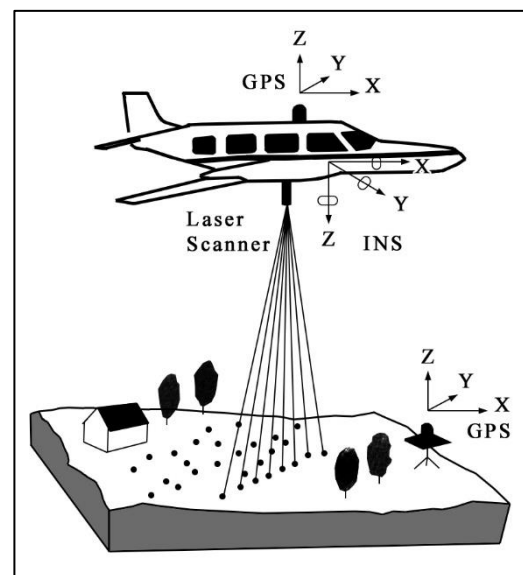
Graden av overflateavrenning avhenger av hvor intens nedbøren er, metningen av jorden, grunnvannsspeil og landdekket. Urbane landdekker, slik som asfalt og betong, er impermeable for vannet som derfor vil samle seg i kanaler på overflaten. Det er også kjent at landbruk har samme effekt, blant annet på grunn av at jorden pakkes tettere og blir mindre permeabelt. Vegetasjonsomr der forsinkes avrenning på grunn av flere årsaker. En av årsakene er at det tas opp mer vann fra bakken. Dette fører til at bakken blir mindre mettet og dermed vil være lettere for vannet å infiltrere. En annen årsak er at mye av regnvannet samler seg i bladene på trær og busker, der mye vil fordampe eller tas opp av treet f r det i det hele tatt n r bakken (Carlson, 2004).

## 3.2 Lidar

I denne analysen vil Lidar (Light detection and ranging) bli brukt som grunnlag for å utvikle digitale terrengmodeller (DTM). Lidar er en teknikk som bruker tilbakespredning av lys for fjernmåling. Denne teknikken kan sammenlignes med radar, men det brukes lys i stedet for radiobølger. Måleinstrumentet sender ut lys som reflekteres tilbake, og bruker tidsforsinkelser og frekvensforskyvning for å sammenligne utsendt og reflektert lys. Ved hjelp av dette kan avstanden og bevegelsen til objektet som sender lyset tilbake fastsettes (Holtet, 2015).

Luftbåren Lidar-teknologi har revolusjonert måten vi lager høyoppløselige DTM-er. Luftbårne Lidar-systemer måler som regel horisontale ( $x$ ,  $y$ ) og vertikale koordinater ( $z$ ) av objektene som reflekteres under, der de resulterende målingene danner en irregulær tredimensjonal punktsky (Zhang et al., 2003). I løpet av ett sekund samles det inn data med  $x$ ,  $y$ ,  $z$  fra vanligvis 5 000 til 100 000 punkter. En generell estimering er at Lidar-data har en feilmargin i målingene på rundt 15 cm i det vertikale planet og 50 til 100 cm i det horisontale planet. De fleste Lidar-systemer bruker en nær infrarød laser som er ute av stand til å penetrere tåke, røyk eller regn. Lidar har også et relativt lite avtrykk med ca. 90 km<sup>2</sup> per time, så det er kostbart å lage Lidar-baserte DTM-er for områder større enn 20 000 km<sup>2</sup> (Nelson et al., 2009).

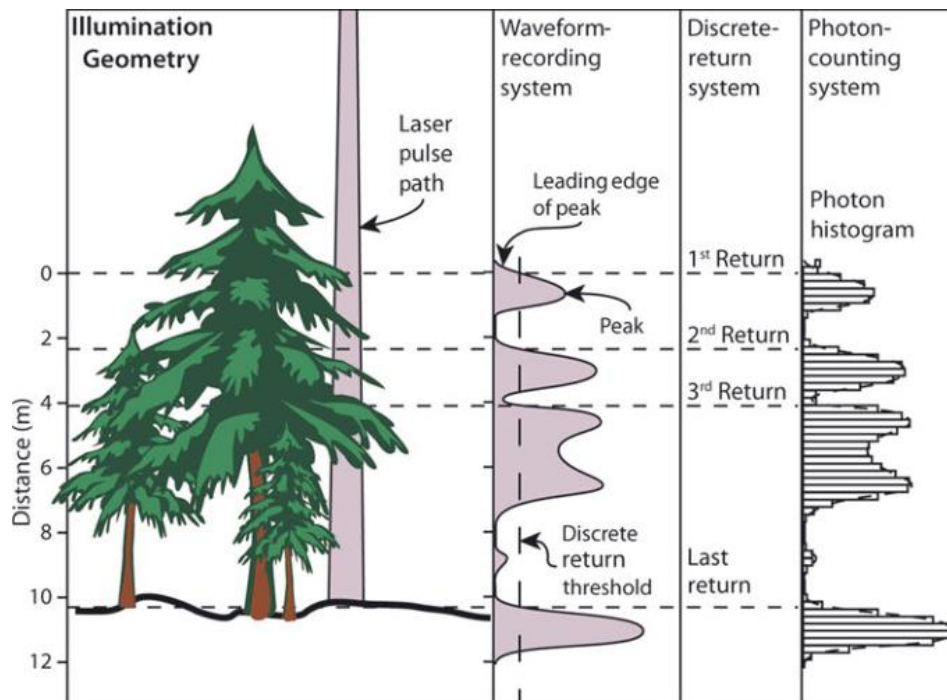
De vanligste sensorene i Lidar-systemer er de diskrete retursensorene. Sensorene er kapable til å motta flere retursignaler, i form av en tilfeldig distribuert tredimensjonal punktsky, fra en enkelt utsending. Et eksempel kan være at det første objektet signalet treffer er tredekket, da vil det være dette dekket som reflekterer det første retursignalet tilbake til sensoren. Hvis dette tredekket er glissent vil noe av signalet fortsette videre ned mot bakken, og treffe andre objekter på veien som vil skape enda flere retursignaler (illustrert i Figur 3-2). Dataene som mottas kan dermed se slik ut:  $x$ ,  $y$ ,  $z_1$ ,  $z_2$ ,  $z_3$ , ...,  $z_n$ , der  $z_1$  er det første (høyest høyde) og  $z_n$  er det siste (lavest høyde) retursignalet. Det siste retursignalet er ofte fra bakkenivå, men hvis vegetasjonen er tett nok kan det stamme fra vegetasjonsdekket i stedet, siden signalet har vært



Figur 3-1: Luftbårne Lidar-målinger måler ikke kun  $x$ ,  $y$  og  $z$  på bakken, men også rotering og helning på flyet (eget arbeid, etter MESH, 2008).



ute av stand til å penetrere helt ned til bakkenivå. Viktigheten med flere retursignaler er derfor at de registrerer karakteristikene både ved bakkenivået og vegetasjonsdekket eller andre strukturer over bakken (Nelson et al., 2009).



Figur 3-2: Retursignaler fra Lidar-målinger som treffer et tre. I dette eksempelet returnerer treet 3 retursignaler før siste retursignal på bakken (Deems et al., 2013).

### 3.2.1 Fordeler

De største fordelene med Lidar er at den kan dekke store områder med høy punkttetthet som gir mye data å jobbe med. Lidar-data har også en god vertikal nøyaktighet sammenlignet med eksempelvis fotogrammetri (Schenk og Csathó, 2002). Fotogrammetri er kort fortalt sammensetningen og orienteringen av to eller flere foto for å kunne bestemme størrelsen og beliggenheten til det fotograferte objektet (Dick, 2018). I fotogrammetri er det større fare for vertikal unøyaktighet på grunn av parallaksen som oppstår ved flytting av kameraet. En høyde eller bygning som er lenger unna kameraet kan fremstå som høyere enn det den egentlig er. Produksjonstiden for DTM-er laget av Lidar-data er også vanligvis raskere enn ved tradisjonell fotogrammetri. I fotogrammetri må en i større grad manuelt kontrollere sammensetningen av overlappende flyfoto ved hjelp av kontrollpunkter på bakken for å kunne utvikle terrengmodeller (Nelson et al., 2009).

### 3.2.2 Ulemper

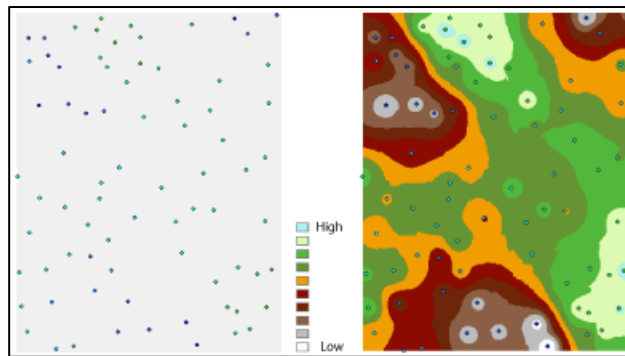
Det finnes også ulemper ved bruk av Lidar. En av ulempene er at det ikke gir noe informasjon om landskapet på bakken, om det for eksempel er et jordbruksområde eller et karrig fjellandskap (Schenk og Csathó, 2002). En annen svakhet er at den måler flere punkter per kvadratmeter i flatt terreng enn i bratt terreng, noe som fører til en overrepresentasjon av punkter i flate terreng og en underrepresentasjon i bratte, komplekse områder. Videre danner den veldig mange punktdata, noe som kan være krevende for maskiner å prosessere på en god måte, og kan dermed by på utfordringer i produksjonsprosessen. Til slutt er det klassifiseringen og filtreringen av alle punktdataene for å skille punkter på bakken fra de over bakken. For å kunne utvikle DTM-er, og for andre bruksområder slik som i skogsdrift, der det skal estimeres tømmervolum eller biomasse ved hjelp av punkter over bakken, er det viktig med metoder og algoritmer som filtrerer ut retursignal fra bakken fra objekter over bakken (Nelson et al., 2009). Selv om det er utviklet flere forskjellige filtreringsmetoder er det ingen som er hundre prosent nøyaktige (Romano, 2004).

Det kan være verdt å merke seg at noen av svakhetene ved Lidar kan kompenseres ved fotogrammetri, og vice versa, så det kan være lurt å bruke en kombinasjon av de to metodene for å utvikle en god DTM (Schenk og Csathó, 2002).

## 3.3 Interpolering

Et Lidar-datasett består av mange punkter med irregulære avstander, og selv om punkttettheten er generelt god vil det være områder der punkttettheten ikke er tilstrekkelig. Det kan være områder det er målt få punkter i utgangspunktet, eller områder med tett vegetasjon, der bakkepunktene ikke blir tatt med og vegetasjonen blir filtrert bort. Man benytter seg derfor av en metode som kalles interpolering for å estimere disse områdene.

Interpolering predikerer verdier for celler i et raster med et begrenset antall datapunkter. Det kan brukes til å predikere ukjente verdier for forskjellige geografiske punktdata, for eksempel høydeverdier for å lage en bedre DTM. Interpolering er basert på en antagelse om at romlig fordelte objekter har en romlig korrelasjon. Det betyr at objekter som ligger nært hverandre også har en tendens til å dele like egenskaper. Hvis det for eksempel regner på én side av gaten, kan man med ganske stor sikkerhet si at det også regner på andre siden av gaten. Det medfører større usikkerhet å si at det derfor regner på andre siden av byen, eller enda større usikkerhet ved å hevde at det er den samme værtypen i et annet land (Esri, 2016c).

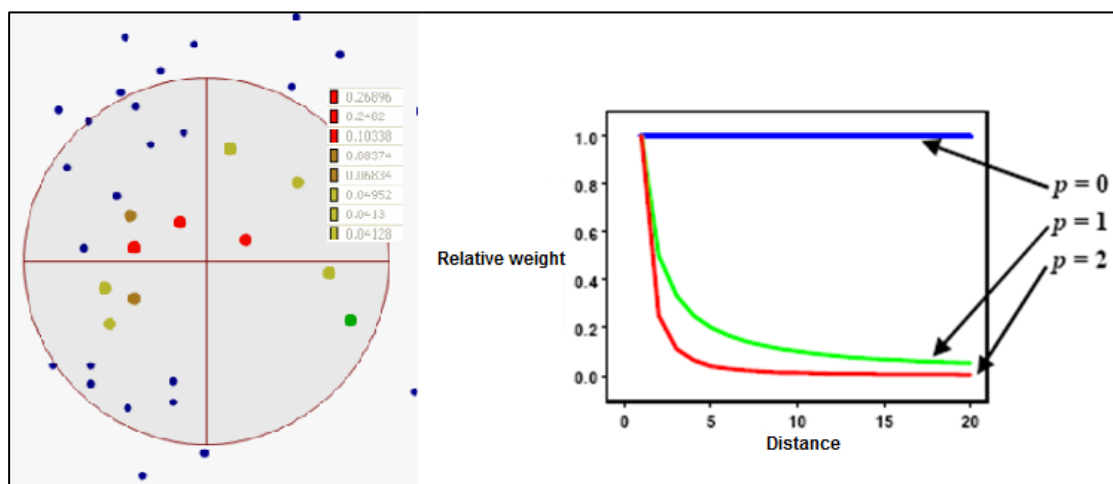


Figur 3-3: Interpolering av høydedata. Bildet til venstre viser punkter med høydeverdier, bildet til høyre viser den interpolerte terrengmodellen (Esri, 2016c).

Basert på denne analogien er det mulig å forstå at verdiene til punkter nære hverandre har høyere sannsynlighet for å være like enn punkter som ligger lengre unna. Det er dette som danner grunnlaget for interpolering (Esri, 2016c). Videre i dette kapitlet presenteres de vanligste interpoleringsmetodene som brukes i ArcMap.

### 3.3.1 Invers avstandsvektning (IDW)

IDW-interpolering jobber eksplisitt ut fra antakelsen om at objekter nære hverandre er mer like enn de lengre unna. For å kunne predikere verdien til et område som ikke er målt, bruker IDW de målte verdiene til punktene rundt området som skal predikeres. Punktdataene som er nærmest stedet som skal predikeres har størst påvirkning på resultatet. IDW antar at hvert målte punkt har et lokalt innflytelsesområde som minsker med romlig distanse. Den tildeler en større vektning til punkter nærmest stedet som skal predikeres, der vektningen minsker som en funksjon av distansen, derav navnet invers avstandsvektning. Et eksempel på hvordan vektning tildeles forskjellige punkter kan ses i Figur 3-4 (Esri, 2017b).



Figur 3-4: Vektning av punkter i IDW. Bildet til venstre viser vektning ut fra interpoleringspunktet, der rød betyr mest vektning. Bildet til høyre forklarer funksjonen  $p$  (Esri, 2017b).

Vekting blir regnet ut fra funksjonen *power*, eller  $p$ . Når distansen øker vil vektingen minske hurtig, og hvor raskt vektingen avtar avhenger av verdien til  $p$ . Hvis  $p = 0$  vil det ikke være noen forminskning. Jo høyere verdien til  $p$  er, jo raskere vil vektingen avta. Standardverdien i ArcMap er  $p = 2$ , men det er ingen teoretisk rettferdiggjørelse bak denne verdien over andre (Esri, 2017b).

### 3.3.2 Spline

Spline er en interpoleringsmetode som estimerer verdier med en matematisk funksjon. Det kan sammenlignes med en fleksibel gummiplate som passerer gjennom punktene samtidig som den minimerer overflatekurvaturen. Resultatet er derfor en jevn overflate som passerer nøyaktig gjennom punktene. Denne metoden er best for å danne overflater med små variasjoner. Det er to typer spline: *regularized* og *tension*. *Regularized* danner en jevn, gradvis forandrende overflate med verdier som kan ligge utenfor punktdataene. *Tension* danner en mindre jevn overflate som er begrenset til verdiene i punktdataene (Esri, 2017e).

### 3.3.3 Kriging

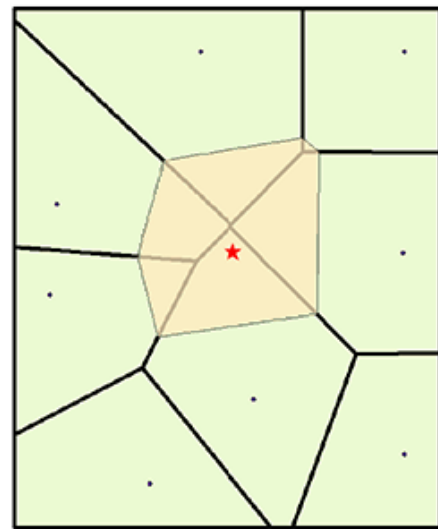
Kriging er en avansert geostatistisk prosedyre som genererer en estimert overflate fra et spredd punktdatasett med  $z$ -verdier. For å bruke kriging effektivt kreves det en større interaktiv undersøkelse av hvilket romlig fenomen  $z$ -verdiene representerer før den beste estimeringsmetoden velges, i motsetning til andre interpoleringsmetoder. IDW og spline betegnes som deterministiske interpoleringsmetoder fordi de er direkte basert på verdiene til de kringliggende punktene, eller på spesifikke matematiske formler som bestemmer jevnheten til overflaten som blir estimert. Kriging er en geostatistisk interpoleringsmetode. Den er basert på statistiske modeller som inkluderer autokorrelasjon: den statistiske sammenhengen mellom punktene. Derfor kan den både danne en estimert overflate og si noe om sikkerheten eller nøyaktigheten til estimatene (Esri, 2017c).

I likhet med IDW bruker kriging vekting for å komme fram til en prediksjon for en umålt overflate, men IDW bruker kun distanse til å beregne denne vektingen. I kriging er vektingen ikke bare basert på distansen mellom de målte punktene og punktet som skal estimeres, men også den totale romlige plasseringen i forhold til de målte punktene. Kriging bruker statistiske metoder som varians og kovarians for å predikere de ukjente verdiene (Esri, 2017c).

### 3.3.4 Naturlig nabo (natural neighbor)

Naturlig nabo bruker en algoritme for å finne de nærmeste punktene til interpoleringspunktet, og vekter punktene basert på proporsjonale områder for å interpolere en verdi. Dets grunnegenskaper er at den er lokal, siden den kun bruker de nærmeste punktene, og de interpolerte høydeverdiene vil garantert havne innenfor de målte verdiene til punktene som brukes i utregningen. Den vil derfor ikke lage toppe, groper, rygger og daler som ikke allerede er representert i punktdataene. Overflaten vil passere gjennom punktene og være jevn overalt, bortsett fra der punktene ligger (Esri, 2017d).

De naturlige naboene til de estimerte punktene er de som assosieres med tilstøtende Voronoi-polygoner. Et Voronoi-diagram er laget basert på de eksisterende punktene, illustrert som grønne polygoner i Figur 3-5. En ny Voronoi-polygon, den gule polygonen, blir laget rundt interpoleringspunktet, illustrert med rød stjerne. Den proporsjonale overlappingen mellom den nye polygonen og de opprinnelige polygonene blir brukt til vektning. I en IDW, som bruker distanseinterpolering, ville det nordligste og nordøstligste punktet fått tilnærmet lik vektning. Naturlig nabo-interpolering vil derimot sette en vektning på henholdsvis 19,12 % og 0,38 %, som er basert på prosentandel overlappning med den nye polygonen (Esri, 2017d).



Figur 3-5: Eksempel på Voronoi-polygon (gult polygon) rundt interpoleringspunktet (rød stjerne) i naturlig nabo-interpolering (Esri, 2017d).

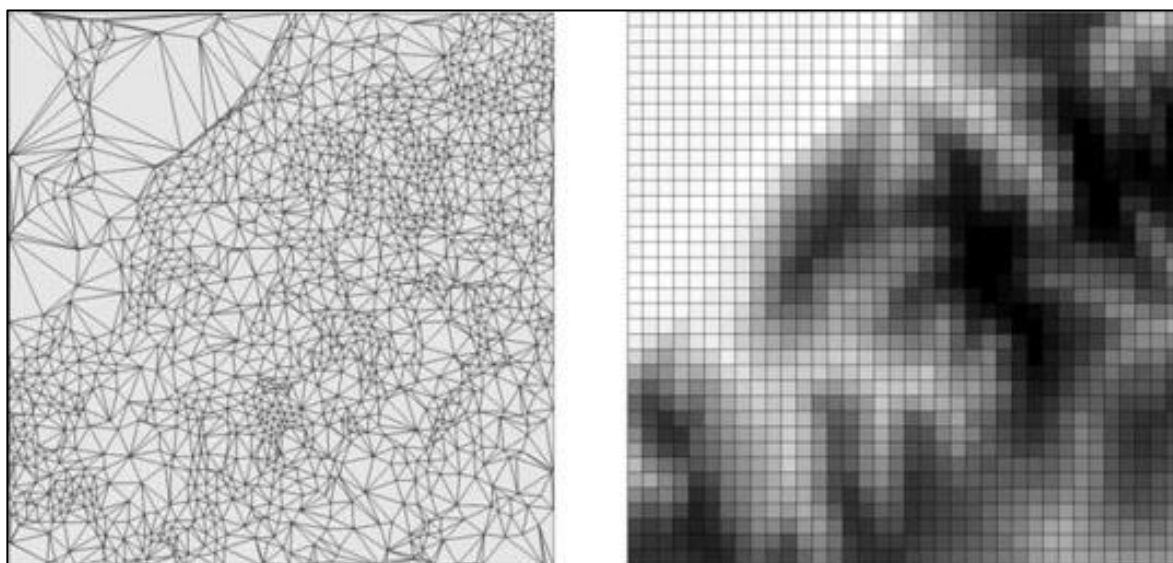
### 3.3.5 Valg av interpoleringsmetode

Alle de ovennevnte metodene kan lage gode terrengmodeller, avhengig av hva du skal bruke terrengmodellen til. I min oppgave må jeg lage en terrengmodell som tar med små forandringer i terrenget for å kunne modellere en god flommodell, og dermed falt valget på naturlig nabo. Tradisjonelle interpoleringsmetoder med vektet snitt, eksempelvis IDW, har en god nøyaktighet hvis punktene er jevnt distribuert, men det er vanskelig å oppnå en god modell når det er en større variasjon i distansen mellom punktene. Hvis det skal velges nabopunkter som skal påvirke egenskapene til interpoleringspunktet må man gjerne ha mer inngående kunnskap om området og datasettet. Med naturlig nabo vil disse problemene

unngås, siden valget av nabopunkter gjøres basert på hvordan punktdataene er distribuert (Ledoux og Gold, 2005). Denne interpoleringsmetoden har i tillegg en tidsfordel, da den er effektiv når det kommer til å behandle store mengder data (Childs, 2004). Naturlig nabo har også den egenskapen at den skaper en ruere overflate uten at den prøver å jevne ut terrenget, slik som i spline og kriging. Fordelen er at mindre rygger og forsenkninger i terrenget vil bli modellert, noe som kan være avgjørende for modelleringen av avrenning og elvekanaler (Pirotti og Tarolli, 2010). Dette kan ses i sammenheng med effektiviteten med større datamengder, da metoder som spline vil trekke linjer gjennom hvert punkt, og dermed kanskje øke prosesseringstiden (Esri, 2017e).

### 3.4 Digitale terrengmodeller

Når geografiske data blir behandlet digitalt vil landoverflaten som regel bli tegnet som en digital terrengmodell. En DTM er en komplett og kontinuerlig flate, og en hovedegenskap er at det skal være mulig å hente ut høydedata uansett hvor i modellen en undersøkelse blir gjennomført. Alle DTM-er kan bli kategorisert inn i to hovedgrupper: vektorbaserte eller irregulære DTM-er, og rasterbaserte eller regulære DTM-er (Hengl og Evans, 2009).

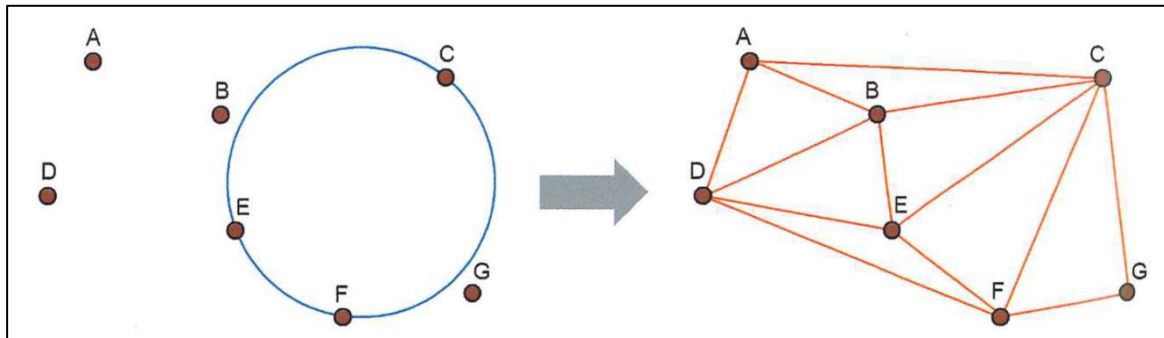


Figur 3-6: DTM-modeller av samme område, vektor til venstre og raster til høyre (Hengl og Evans, 2009).

#### 3.4.1 Irregulære modeller (vektor)

For områder med et variert relieff, eller mer ujevnt terreng, kan irregulære DTM-er bruke kortere avstand mellom punktene, og lenger avstand der terrenget er jevnere med et lavt relieff. I kraft av dette vil irregulære DTM-er være mer presise når det kommer til å gjengi forkastninger og andre tydelige høydeforandringer, samtidig som den bruker like mange

punkter som i et grid. Rådata fra kart- og oppmålingsarbeid, slik som Lidar, illustreres vanligvis med irregulære punktkart (Hengl og Evans, 2009).



Figur 3-7: TIN-struktur basert på Delaunay-triangulering. Massepunktene til venstre og TIN-strukturen til høyre. Figuren er hentet fra Rød (2015) side 184.

Omdanningen av en punktsky til en komplett DTM kan gjennomføres ved hjelp av triangulering (Hengl og Evans, 2009). Som regel benyttes Delaunay-triangulering når trianglene skal beregnes (Rød, 2015). I boken *GIS – verktøy for å forstå verden* beskrives metoden slik:

*Delaunay-triangulering ... er en metode som lager trekanter mellom et sett av punkter slik at ingen punkter er innenfor en trekants omskrevne sirkel. [...] En av fordelene ved Delaunay-triangulering er at trekantene dannes med størst mulig grad av regularitet; metoden forsøker å danne trekanter som er så likesidete som mulig. Dermed vil en minimere antallet lange og tynne trekanter som vil være uheldig for flere anvendelser (Rød, 2015 side 184).*

Resultatet er et TIN (triangulert irregulært nettverk), der det er parametere for hvert punkt og hvert triangel. Et TIN kan være plant, men som regel i GIS-sammenheng er de 3D-strukturer med høydedata for hvert punkt i triangelet. En fordel med denne modellen er at den krever få punkter for å gjengi markante høydeforandringer. Samtidig må man være klar over at et TIN, per definisjon, er usammenhengende. Med dette menes at verdiene mellom forskjellige triangler endres brått, og kan dermed skape kunstige brekklinjer i modellen. En TIN-modell gjengir derfor diskrete topografiske forandringer mer nøyaktig, mens den kan være misvisende på steder der terrenget er relativt flatt (Hengl og Evans, 2009).

Ved modellering av fenomener som beveger seg med gravitasjonskraft, slik som ved hydrologiske modelleringer, er TIN en metode med sterk relevans (Hengl og Evans, 2009). Likevel må en regne med å foreta en del justeringer av terrenget for å kunne oppnå gode hydrologiske resultater, spesielt i områder der terrenget er flatt. Siden det er større

avstander mellom punktene og små høydeforskjeller vil det oppstå større lateral bevegelse i modellen enn det som forekommer naturlig. En slik manipulering av modellen krever en del forhåndskunnskap og tid, og dermed forringer noen av fordelene ved å bruke TIN (Moore et al., 1991).

### 3.4.2 Regulære modeller (raster)

I en raster-DTM er høydedata lagret i et grid med celler der avstanden mellom hver celle er konsekvent gjennom hele området. Siden det er en jevn avstand mellom hver celle kan koordinater i det horisontale planet ( $x$  og  $y$ ) enkelt beregnes for alle punkter. Selv om det finnes gode argumenter for bruken av både vektor- og rastermodeller til geomorfologiske undersøkelser er raster-DTM-er sett på som standarden (Hengl og Evans, 2009). Hengl og Evans (2009) mener en DTM med en gridstruktur har følgende fordeler:

- Et grid har en simpel struktur som enkelt kan rekonstrueres.
- Det er vesentlig enklere å designe parametere for landoverflaten og strukturer, siden algoritmene er enklere.
- Et grid har en konsistent romlig struktur, nesten alle egenskapene ved en grid-DTM defineres i cellene.
- En gridmodell er mer tilpasset datamodelleringer som brukes i bildebehandling og til utskrivning.

Samme kilde lister også følgende ulemper:

- Grid underrepresenterer områder med en kompleks topografisk struktur, og overrepresenterer områder med en jevn, flat struktur.
- Reprojisering av et grid går sakte og fører til mindre nøyaktighet. Dette er fordi det opprinnelige gridet mister sin regulære struktur i en ny projeksjon, og dermed må celleverdiene beregnes på nytt.
- De forskjellige distansene mellom midtpunktene til cellene i diagonal- og himmelretningene har en negativ påvirkning på presisjonen for mye hydrologisk modellering.

Selv om gridmodeller tilsynelatende er jevne og kontinuerlige, er de også en diskret presentasjon av topografi. Etter at størrelsen på gridet er definert vet man ikke om den romlige variasjonen mellom cellene er jevn eller ikke (Hengl og Evans, 2009).



### 3.4.3 Cellestørrelse

Cellestørrelse sier noe om hvor detaljert og nøyaktig et kart er, og kan relateres til skala. Større celler medfører en grovere cellestruktur, som igjen fører til aggregering av topografiske parametere og større skala. Mindre celler fører til en finere cellestruktur, der det blir en bedre oppdeling eller disaggregering av topografiske parametere. En forminskning i cellestørrelse fører til mindre skala. En økning av størrelsen på cellene betyr dermed at mengden informasjon i kartet vil minske, og vice versa (McBratney, 1998).

Når cellestørrelse skal velges er det en del hensyn å ta. Det er viktig å tenke på både hvordan terrenget er i området som skal modelleres, og hva modellen skal brukes til. I flatt terreng er det ikke behov for en fin cellestruktur, i motsetning til i et bratt og komplekst terreng. Samtidig er et grid alltid et kompromiss mellom nøyaktighet og effektivitet. Høyere oppløsning på cellestrukturen gir mer nøyaktighet, men det øker prosesseringstiden betraktelig. Det finnes derfor ikke noe godt svar på hvilken cellestørrelse som er optimal, så man bør heller finne en cellestørrelse som er god nok for skalaen det skal arbeides i (Hengl og Evans, 2009).

## 3.5 Hydrologisk analyse

Hydrologi er læren om vannet, deriblant dets kretsløp og fordeling på landjorden. Her ser en blant annet på vannets fysiske egenskaper, og hvordan det oppfører seg med sine omgivelser og menneskelige aktiviteter. Dette omfatter nedbør, fordampning, grunnvann og avrenning i vassdragene (Tollan, 2009). Vannets bevegelse påvirkes primært av tyngdekraften, og til en viss grad av egenskapene ved materialet det flyter over eller gjennom. Tyngdekraftens effekt kan i stor grad beregnes ut fra terrengmodellen, mens overflatiske og underjordiske egenskaper kan være vanskelige og tidkrevende å beregne (Gruber og Peckham, 2009).

### 3.5.1 Steady flow i HEC-RAS

HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) er en programvare som er laget for å lettere beregne de forskjellige parameterne som avgjør vannets bevegelser i et elvesystem. Programmet inneholder flere forskjellige komponenter for beregning av endimensjonale strømningsberegninger, deriblant *steady flow*-profiler for vannflateberegninger (Brunner, 2016).

*Steady flow* er laget for å beregne vannflateprofiler i elvenettverk med et gradvis varierende, stødig flytregime. Beregningsprosedyrene er basert på den endimensjonale energilikningen, hvor blant annet energitap beregnes ut fra friksjon (Mannings formel) og kontraksjon/ekspansjon. Effekten av bruer, stikkrenner og andre strukturer i elvesletten kan også beregnes (Brunner, 2016).

### 3.5.1.1 Beregningsformler i steady flow

For beregningen av *steady flow* i HEC-RAS benyttes flere forskjellige formler. To av formlene som utfører de grunnleggende beregningene i analysen vil bli forklart nedenfor. All informasjon er hentet fra *Hydraulic reference manual* av Brunner (2016).

#### *Grunnleggende formel for beregning av profiler*

For at programmet skal kunne beregne profiler må det først lages tverrsnitt som ligger vinkelrett med elveretningen og som dekker hele elvesletten. Tverrsnittene tegnes inn manuelt av brukeren i programmet. Programmet beregner en høydeprofil av bakken der tverrsnittene er tegnet inn og kalkulerer distansen fra et tverrsnitt til et annet i strømningsretningen til elva. Vannflateprofiler beregnes i tverrsnittene fra opp- til nedstrøms ved å løse energilikningen i en iterativ prosedyre. Energilikningen ser slik ut:

*Formel 3-1: Energilikningen*

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

$Z_1, Z_2$  = høyden til elvebunnen fra datum

$Y_1, Y_2$  = vanddybde i tverrsnittene

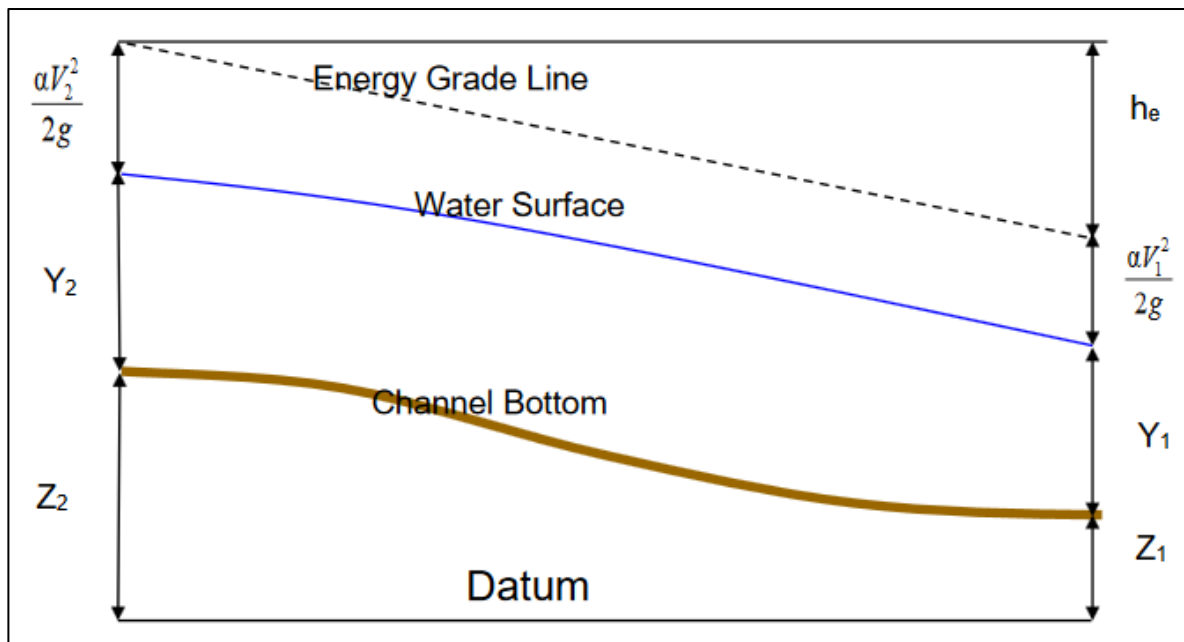
$V_1, V_2$  = gjennomsnittlig hastighet

$a_1, a_2$  = koeffisienter for vektning av hastighet

$g$  = akselerasjon fra tyngdekraften

$h_e$  = energitap

Et diagram som viser de forskjellige definisjonene i energilikningen (Formel 3-1) illustreres i Figur 3-8. Energitapet  $h_e$  mellom to tverrsnitt består av friksjonstap og kontraksjons- eller ekspansjonstap.



Figur 3-8: Definisjoner for forskjellige parametre i energilikningen (Brunner, 2016).

### Inndeling av tverrsnitt for beregning av transporteringssevne

Bestemmelsen av den totale transporteringssevnen og hastighetskoeffisienten i et tverrsnitt krever at strømmingen blir delt inn i enheter der hastigheten er jevnt fordelt. I HEC-RAS skjer denne inndelingen på punkter der Mannings ruhefsfaktor endrer seg. Transporteringsevnen for hver inndeling beregnes ut fra en av Mannings formler (basert på engelske enheter):

Formel 3-2: Beregning av total transporteringssevne.

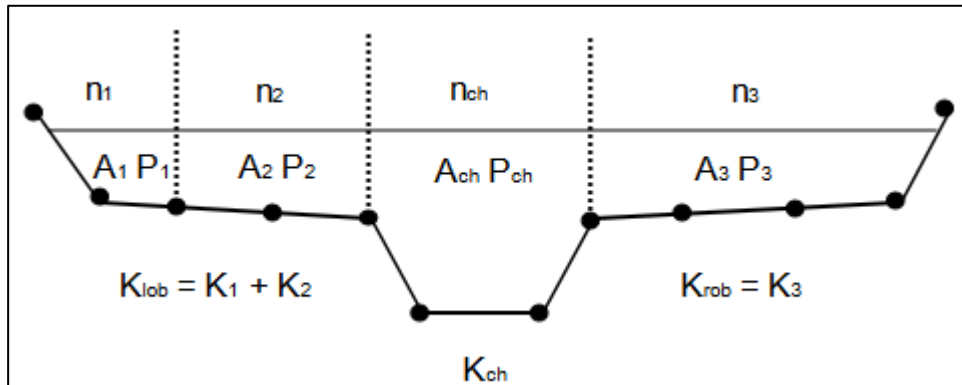
$$Q = KS_f^{1/2}$$

$$K = \frac{1,486}{n} AR^{2/3}$$

- $K$  = transportevne for inndelingen
- $n$  = Mannings ruhefsfaktor for inndelingen
- $A$  = strømningsområde for inndelingen
- $R$  = hydraulisk radius for inndelingen
- $S_f$  = helningen til energigradienten  
(energy grade line i Figur 3-8)

Programmet summerer alle inkrementelle transporteringsverdier i elvebankene for å oppnå en transporteringssevne for venstre elvebank (*left overbank*) og høyre elvebank (*right overbank*). Hovedkanalen beregnes vanligvis som ett transporteringsselement. Den totale

transporteringsevnen for tverrsnittet beregnes ved å summere transportevnen for de tre inndelingene (venstre, hovedkanal og høyre), vist i Figur 3-9.



Figur 3-9: Inndeling av tverrsnitt for beregning av total transporteringsevne (Brunner, 2016).

### Mannings ruhefsfaktor

Mannings ruhefsfaktor ( $n$ ) representerer motstanden til strømmingen av vann i elvekanalene og -slettene. Ruhefsfaktoren er en viktig komponent i beregningene av strømminger til bruk i hydrologisk modellering (Arcement og Schneider, 1989).

HEC-RAS benytter naturligvis flere beregningsmetoder for en *steady flow*-analyse enn disse. Dette inkluderer blant annet beregninger av gjennomsnittlig kinetisk energi, friksjonstap, kontraksjons- og ekspansjonstap, bevegelsesenergi (*momentum*), og bestemmelse av kritisk dybde. For en full gjennomgang av alle beregninger og formler, henvises leseren til delkapittel 2-2 i *Hydraulic reference manual* skrevet av Brunner (2016).

#### 3.5.1.2 Begrensninger

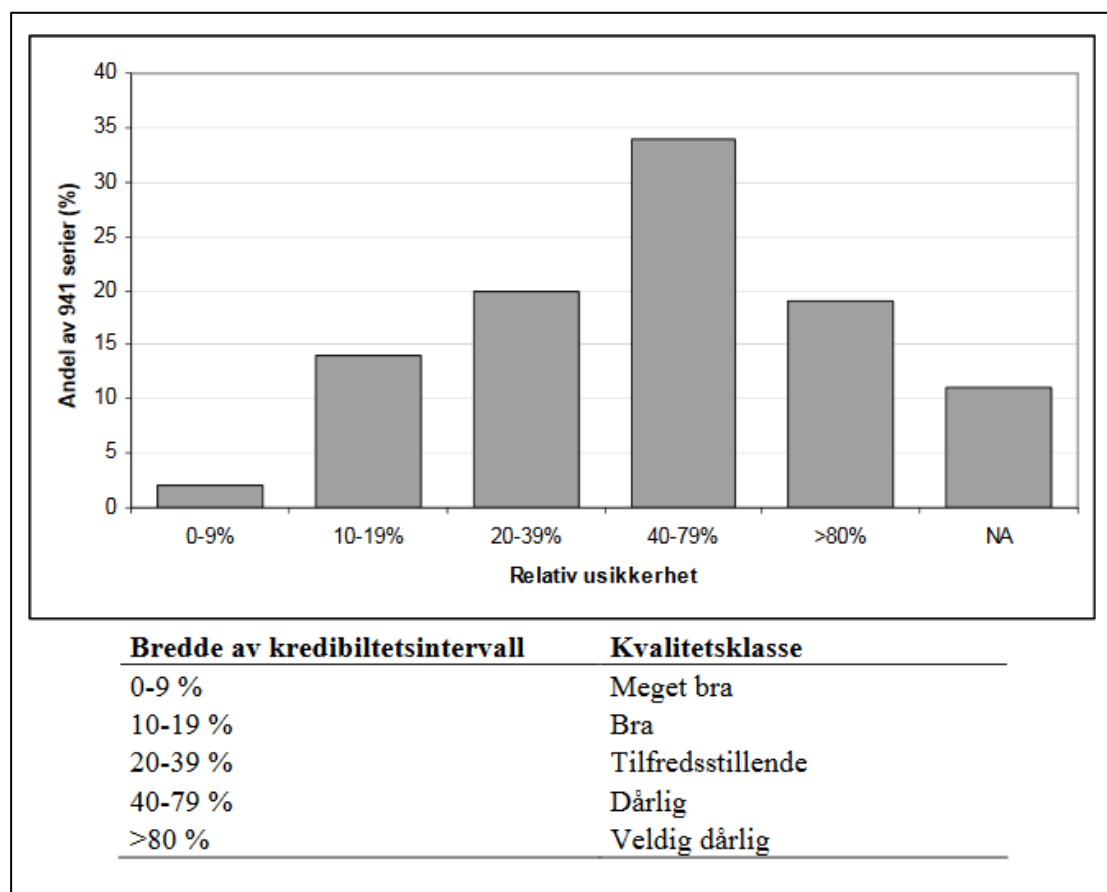
I HEC-RAS 5.0 har endimensjonal *steady flow*-modellering visse begrensninger, og følgende antakelser ligger implisitt i analysen:

1. Strømmingen er stødig.
2. Strømmingen er gradvis varierende. Unntaket er ved strukturer slik som bruer, stikkrenner og overløp. Ved disse stedene kan strømming være svært varierende, og derfor vil likningen for bevegelsesenergi og andre likninger brukes i stedet for energilikningen.
3. Strømmingen er endimensjonal. Det vil si at parametere som påvirker hastighet i andre retninger enn strømningsretningen ikke vil bli beregnet.
4. Elvekanalene har en liten helning, mindre enn 1:10.

Disse antakelsene er der på grunn av begrensninger i likningene som brukes til utregningene. Blant annet antas strømmingen å være stødig fordi tidsavhengige parametere er ikke inkludert i energilikningen. Begrensningen i helning på mer enn 1:10 kan utbedres, men det vil alltid være faktorer som spiller en rolle i større helninger som kanskje ikke blir beregnet i HEC-RAS (Brunner, 2016).

### 3.5.2 NEVINA

NVE har utviklet et verktøy kalt NEVINA, som i et vilkårlig nedbørsfelt beregner utvalgte klima- og feltparametere automatisk. Informasjonen kan benyttes til forskjellige hydrologiske beregninger. Under genereringen av de forskjellige parameterne vil nedbørsfeltet oppfattes som uregulert, og dermed vil resultatene inneholde en del usikkerhet. NEVINA vil blant annet beregne feltareal, effektiv sjøprosent, snaufjellprosent, nedbør og middelavrenning, samt estimere lavvannsindeks (NVE, 2015).



Figur 3-10: Kvalitetsvurdering av lavvannsmålinger brukt i NEVINA (Engeland et al., 2008).

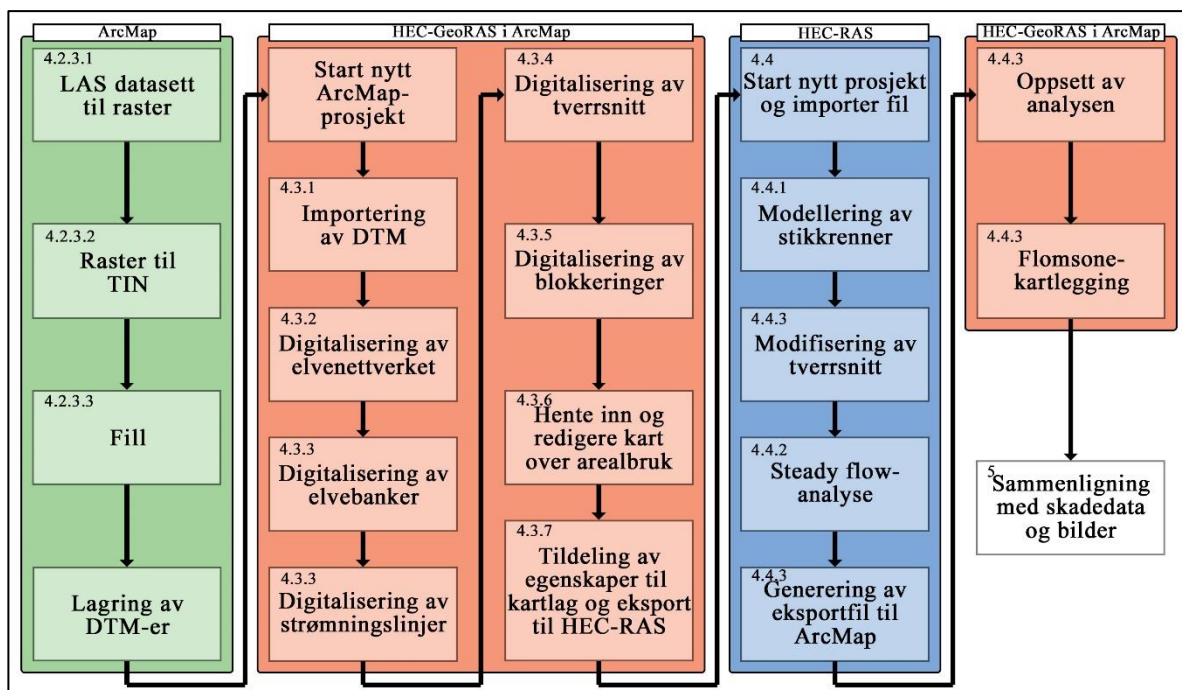
Beregningene baseres på data fra 318 værstasjoner i Norge, som ble valgt på bakgrunn av kvalitet på vannføringene og lengden på dataseriene. Det ble gjort et utvalg bestående av minst 15 år med data, fortrinnsvis fra perioden 1960 til 2000. Noe data fra før 1960 ble tatt

med på grunn av utbygging av vassdrag, der vannføring påvirkes. Det ble gjennomført en vurdering av kvaliteten på dataene for lave vannføringer, vist i Figur 3-10. Figuren viser tydelig at det er knyttet en del usikkerhet knyttet til en mengde av dataene, og data vurdert til å ha veldig dårlig kvalitet ble ikke tatt med i analysen (Engeland et al., 2008).

Feltparametere beregnes ut fra arealdekningsdata basert på N50-kartene, med en målestokk på 1:50 000. Høydemodellen har en oppløsning på 25 x 25 meter. Data for temperatur og nedbør er gjennomsnittsverdier for perioden 1961 til 1990 på et grid med en oppløsning på 1 x 1 km gitt av Meteorologisk Institutt (Engeland et al., 2008).

## Kapittel 4 - Metode

Arbeidet med analysene i denne oppgaven er gjort i tre programmer: (1) ArcMap av Esri, og (2) HEC-GeoRAS og (3) HEC-RAS utviklet av USACE. ArcMap er et GIS-program som her vil bli brukt til å modellere terrenget. HEC-GeoRAS er et tillegg til ArcMap. Det brukes til å digitalisere de nødvendige parameterne som kreves for å gjennomføre en hydrologisk analyse i HEC-RAS, samt visualisering av de produserte flomsonene. Brorparten av de hydrologiske analysene i denne oppgaven vil bli utført i HEC-RAS, og en gjennomgang av arbeidsflyten kan ses i Figur 4-1 under.



Figur 4-1: Arbeidsflyt i ArcMap (i grønt), HEC-GeoRAS (i rødt) og HEC-RAS (i blått). Nummeret øverst til venstre i hvert rektangel korresponderer til nummeret til delkapitlet arbeidsmetoden blir forklart.

### 4.1 Datainnsamling

Lidar-data er hentet inn fra hoydedata.no, en ressurside som er utviklet og driftes av Statens Kartverk. Dataene er hentet fra skanninger utført i 2012 og 2013, i henholdsvis nedre og øvre del av prosjektområdet (Høydedata, 2018), og danner grunnlaget for utviklingen av terrengmodellene i denne analysen. Siden målingene ble gjort i 2012 og 2013 er ikke den nye E6-en og alt arbeidet gjort rundt den nye veien med i terrengmodellen som brukes.

Konsekvensen er dermed at den produserte terrengmodellen ikke vil være korrekt helt nederst

i vassdraget. SFKB-data er Norges offentlige kartverk, og er benyttet som grunnlagsdata i analysen. SFKB er en samling av forskjellige datasett som blir skaffet til veie gjennom samarbeid mellom norske kommuner og Statens Kartverk, og oppdateres automatisk inn til en sentral database hos Kartverket (Kartverket, 2018a; Mæhlum, 2016). Datasettene fra SFKB som er relevante i denne analysen er knyttet til vann, arealbruk, bygninger og infrastruktur.

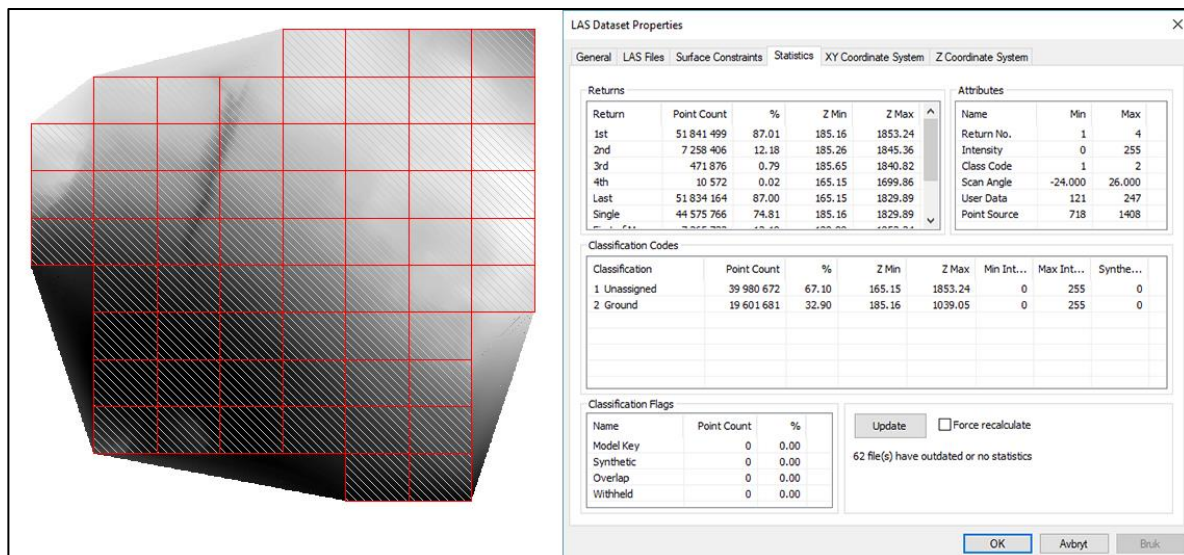
Stadfesting av stikkrenner er gjort i HEC-RAS. Opprinnelig foretok jeg, sammen med to medstudenter, GPS-målinger av posisjonene til inngangene og utgangene av stikkrennene under feltarbeid i juli 2017. I HEC-RAS plasseres inngangen og utgangen til strukturene ut fra tverrsnittene, som forklart i delkapittel 4.4.1.3 om modellering av stikkrenner, og derfor er ikke disse målingene brukt i analysen. Under feltarbeidet ble det også foretatt målinger av dimensjonene til stikkrennene, i det minste der det kunne la seg gjøre. Noen steder lå så utilgjengelig til at det var svært vanskelig og delvis risikabelt å få tatt nøyaktige målinger. Dimensjonene til stikkrennene med manglende målinger er derfor bestemt ut fra de kringliggende stikkrennene. Stikkrenner som lå alene eller i klynger ble bestemt av gjennomsnittet til de opp- og nedstrøms. Stikkrennene som lå i par fikk like dimensjoner som den like over eller under. I tillegg ble informasjon om noen stikkrenner hentet fra nasjonal vegdatabank (NVDB), en database med opplysninger om blant annet statlige og kommunale veier (Statens Vegvesen, 2017).

## 4.2 Utvikling av terrengmodell

### 4.2.1 Lidar og LAS-filer

Området Brandrudsåa og omegn består av 62 LAS-filer med et samlet antall Lidar-punkter på 59 582 353, hvor 19 601 681 av de er klassifisert som bakkepunkter. Dette tilsvarer 32,9 % av punktene. Lidar-dataene blir levert med en romlig referanse, og det er viktig at alle filene og modellene som lages bruker like koordinatsystemer. Den horisontale referansen er UTM zone 32N med WGS 1984 som datum. Den vertikale er NN54, et høydekoordinatsystem laget for Norge (Harsson et al., 2009).





Figur 4-2: Til venstre: LAS-filene lagt på den resulterende DTM-en.  
Til høyre: antall punkter i LAS-datasettet hentet fra ArcCatalog.

## 4.2.2 Oppløsning

I rasterdata henger oppløsning sammen med celledørrelse. En lavere celledørrelse betyr høyere oppløsning, siden det blir flere punkter. Med henblikk på delkapittel 3.4.3 vet jeg at det ved valg av celledørrelse er flere hensyn å ta. Der nøyaktigheten øker med mindre celledørrelse, vil også prosesseringstiden øke. Høyere oppløsning kan medføre feil i modellen der terrenget ikke er komplekst, siden interpoleringsmetoden kan lage artefakter, eller egenskaper ved terrenget som egentlig ikke er der. Valg av celledørrelse er dermed et kompromiss mellom tid, punkttettheten, ønsket nøyaktighet, bruksområde og kompleksiteten til terrenget i analyseområdet (Hengl og Evans, 2009; Liu, 2008).

McCullagh (1988) laget en enkel likning for å kunne bestemme celledørrelsen i et grid. Oppløsningen til en DTM er svært avhengig av punkttettheten i de originale lasermålingene, og han mente dermed at antall celler skal være omtrent likt antall datapunkter i området. For en bedre estimering av oppløsning utviklet han følgende formel:

Formel 4-1: McCullaghs formel

$$S = \sqrt{\frac{A}{n}}$$

Her er  $n$  antall datapunkter og  $A$  arealet til området. Dette betyr at oppløsningen til DTM-en vil matche punkttettheten til det originale datasettet. Kritikken mot denne formelen er at den ikke tar med kompleksiteten til terrenget i estimatet. Det er derfor utviklet andre formler, blant annet hvor bølgetettheten basert på antall bøyingspunkter i retursignalet er en del av

beregningen (Liu, 2008; McCullagh, 1988). De tallene sitter ikke jeg med, og vil derfor benytte meg av McCullagh sin formel. Som nevnt er det 19 601 681 bakkepunkter i datasettet og arealet er 33 588 288 m<sup>2</sup>. Likningen blir dermed seende slik ut:

Formel 4-2: McCullaghs formel utfylt.

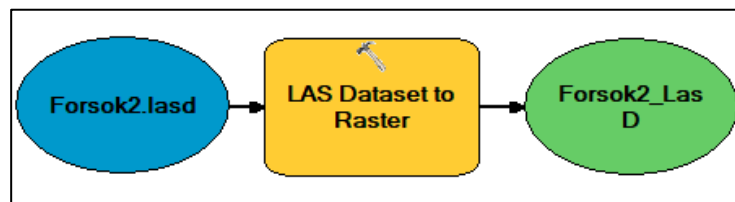
$$S = \sqrt{\frac{33\,588\,288}{19\,601\,681}} \approx 1,3$$

Med denne utregningsmetoden blir passende cellestørrelse estimert til ca. 1,3. For å øke nøyaktigheten, uten å øke prosesseringstiden nevneverdig, ble det bestemt en cellestørrelse på 1 x 1 m. Området er varierende i kompleksitet, med et høyere relieff i øvre kontra nedre del av vassdraget, og derfor ser jeg på dette valget som et fint kompromiss.

### 4.2.3 Generering av DTM

For analysen ble det laget to forskjellige DTM-er: et raster- og et vektorbasert DTM. Den rasterbaserte er laget på basis av punktskyen i LAS-datasettet mens den vektorbaserte er avledet fra den rasterbaserte DTM-en.

#### 4.2.3.1 LAS dataset to raster



Figur 4-3: Arbeidsflyten i LAS dataset to raster.

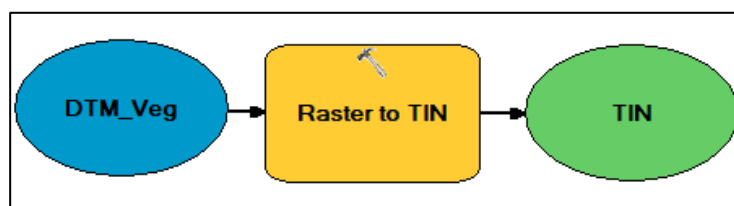
*LAS dataset to raster* er et verktøy for å lage en raster-DTM fra LAS-data. Esri (2016b) skriver at verktøyet bruker *binning* for å bestemme verdien til en piksel. Piksel er det samme som cellestørrelse og er dermed satt til 1 x 1 m. *Binning* bestemmer pikselverdien ved å undersøke parameterne til punktene som faller innenfor pikselen og ut fra dette beregne den endelige verdien. Følgende input blir brukt:

- *Cell aggregation type*: bestemmer hvilken *z*-verdi som skal brukes hvis det er flere enn ett punkt innenfor pikselen.
  - *Maximum*: Bruker den største *z*-verdien
  - *Minimum*: Bruker den minste *z*-verdien
  - *Mean*: Bruker gjennomsnittlig *z*-verdi

- *Void filling*: tomrom (*void*) oppstår når det er ingen punkter innenfor pikselen i rastergridet.
  - *None*: Ingen tomrom blir fylt. Ingen verdi (*NoData*) blir tildelt cellen.
  - *Simple*: Bruker gjennomsnittet fra opptil åtte naboceller rundt *NoData*-cellen for å estimere *z*-verdien.
  - *Plane fitting/IDW*: Bruker *simple*-metoden først og deretter *plane fitting*, men hvis feilmarginen blir for stor brukes IDW.
  - *Linear (triangulation)*: Estimerer *z*-verdier ved å triangulere fra punkter med kjente *x*- og *y*-verdier.
  - *Natural neighbor (triangulation)*: Estimerer *z*-verdier ved å bruke naturlig nabo-interpolering.

Som tidligere nevnt vil jeg bruke *naturlig nabo* som interpoleringsmetode, samt *mean* som celleaggregeringstype.

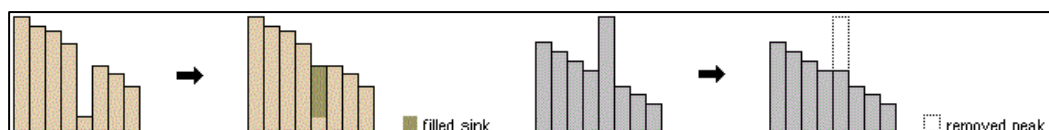
#### 4.2.3.2 Raster to TIN



Figur 4-4: Arbeidsflyten i raster to TIN.

*Raster to TIN*-verktøyet lager et TIN med en flate som ikke avviker fra en input-raster med mer enn en angitt *z*-toleranse. Den lager først et TIN med nok punkter fra input-rasteret til å dekke hele området, før den stegvis forbedrer TIN-et til den når den spesifiserte *z*-toleransen. Det gjør den ved å legge til flere punkter etter behov i en iterativ prosess (Esri, 2016a).

#### 4.2.3.3 Fill



Figur 4-5: Fill kan både fylle synkehull og fjerne topper som ikke følger trender i terrenget (Esri, 2017a).

Forsenkninger (*sinks*) må fylles før det kan gjennomføres en hydrologisk analyse.

Forsenkninger oppstår når en DTM har blitt generert, og kan ha en påvirkning på flomanalyser siden vannet vil samle seg i forsenkningene. De oppstår vanligvis på grunn av målefeil eller lav punkttetthet i datasettet DTM-en er laget fra (Reuter et al., 2009).

## 4.3 HEC-GeoRAS

HEC-GeoRAS er et tillegg til ArcMap som lager en fil med geometriske data som kan importeres inn i HEC-RAS. Importfilen er laget fra datasett generert i ArcMap og fra en DTM. Det kreves at terrengmodellen er enten et TIN (vektor) eller et GRID (raster), og de geometriske dataene, også kalt RAS-lag, lages med terrengmodellen som grunnlag. Etter at hydrologiske beregninger er gjort i HEC-RAS, eksporteres resultatene tilbake til ArcMap og HEC-GeoRAS for romlig analyse (Ackerman, 2012).

### 4.3.1 RAS-lag

Før RAS-lagene digitaliseres må DTM-en laget i ArcMap importeres i et TIN eller GRID-format. Med henblikk delkapittel 3.4.1 er TIN et egnet format for modellering av hydrologiske fenomener, og derfor falt valget på dette. GRID vil bli brukt senere som et sammenligningsgrunnlag ved analyser i HEC-RAS. Koordinatsystemet blir bestemt ut fra DTM-en og er derfor WGS 1984 UTM zone 32N med NN54 som vertikalt koordinatsystem (Ackerman, 2012; Hengl og Evans, 2009).

Etter importeringen digitaliseres RAS-lagene som skal brukes til utviklingen av geometriske data. Disse lagene består av vektordata og legges til via menyen *RAS geometry* i HEC-GeoRAS. De obligatoriske lagene er elvenettverket (*stream centerline*), som brukes til å angi identifikatorer for elva, og tverrsnitt (*cross-sectional cut lines*). Begge lagene er vektorlinjer. Valgfrie lag inkluderer blant annet (etter Ackerman, 2012):

- *Banks*: Linjer som angir elvebanker.
- *Flow path centerlines*: Linjer som angir hvor massesentrumet til strømmen i hovedkanalen, venstre elvebank og høyre elvebank ligger. Brukes til å bestemme nedstrøms lengde mellom tverrsnittene.
- *Land use*: Polygoner med informasjon om arealbruk for å estimere Mannings  $n$ -verdier.
- *Ineffective flow areas*: Polygoner som angir områder som inneholder vann, men hvor vannets transporteringsevne er ineffektiv eller inaktiv.
- *Blocked obstructions*: Polygoner som angir blokkeringer og obstruksjoner.
- *Bridges/culverts*: Linjer som angir bruer og stikkrenner.

I tillegg til de ovennevnte lagene er det mulig å tegne inn lag som angir plasseringer av flomvoller, demninger og andre konstruksjoner. Under følger en gjennomgang av hvert lag

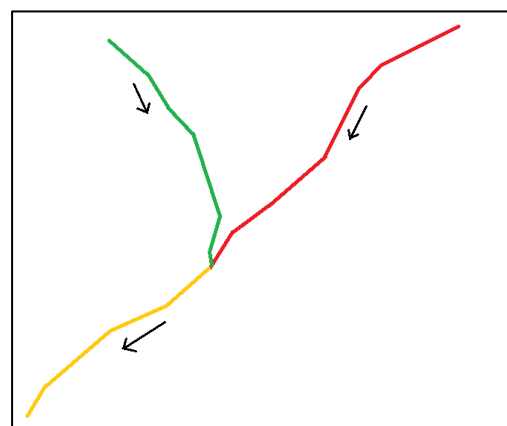
som ble lagt inn, der rekkefølgen på kapitlene følger den samme rekkefølgen jeg digitaliserte lagene i. Rekkefølgen er hentet fra kapittel 8 i *GIS tools for support of HEC-RAS using ArcGIS*, brukermanualen til HEC-GeoRAS skrevet av Ackerman (2012). Alle lagene blir digitalisert som linjer eller polygoner med verktøyet *edit*, det grunnleggende redigeringsverktøyet allerede inkludert i ArcMap (Ackerman, 2012).

### 4.3.2 Elvenettverket (stream centerline)

Digitaliseringen av elvenettverket er obligatorisk og må gjøres før noe annet legges inn. Elvenettverket må tegnes inn fra opp- til nedstrøms. Det er mulig å bruke et eksisterende datasett, men da må det konverteres til et datasett som støttes av HEC-GeoRAS, samt inneholde en *HydroID* – en unik identifikator som brukes av programmet (Ackerman, 2012). For å være sikker på at alt ble gjort riktig valgte jeg å digitalisere elvenettverket selv. Tegningen av elvenettverket definerer hvordan de forskjellige delene i nettverket henger sammen, og det er viktig at hver sideelv er koblet sammen for at modelleringen skal bli rett. Hver elv navngis for å gi den en unik identifikator, gjennom et verktøy som tildeler en *river-* og *reach ID*. Disse elveidentifikatorene brukes som referanse for resten av RAS-lagene som skal tegnes inn. Tverrsnitt, for eksempel, må ha en *river-*, *reach-* og *river station-*identifikator. *River* og *reach* definerer hvilken elv tverrsnittet ligger i, basert på identifikatorene. *River station* forteller hvor tverrsnittet ligger i forhold til de andre tverrsnittene i samme sideelv (Brunner, 2016). *River station* forklares nærmere i delkapittel 4.3.4.

Elvene ble tegnet inn som vektorlinjer i ArcMap, der digitaliseringen startet fra oppstrøms til nedstrøms mot utløpet i Lågen. Ifølge Brunner (2016) må linjene ligge i den retningen for at beregningene skal bli riktige. Eventuelle «kryss» der elvene møtes må tegnes inn som tre forskjellige deler, med det menes at elva som dannes etter et elvemøte må tegnes som en egen linje (som gul linje i Figur 4-6). De første gangene elva ble digitalisert tegnet jeg inn sideelvene, men på grunn av problemer valgte jeg å gå bort fra dette i den endelige modellen. Grundigere

begrunnelse for denne avgjørelsen blir beskrevet i delkapittel 6.2.3. Etter at elva var tegnet inn



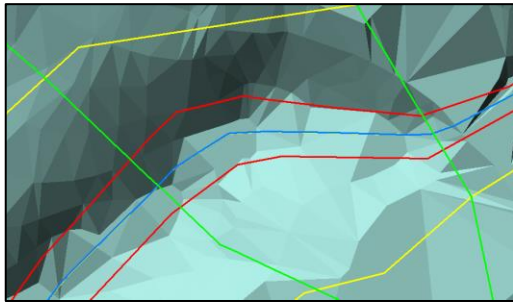
Figur 4-6: Eksempel på «kryss» i HEC-RAS, der grønn, rød og gul elv er hver sine linjer, men er koblet sammen. Dette til tross for at grønn elv blir ansett som sideelv til rød og gul.

ble verktøyet *reach and river ID* brukt for å tildele den en identifikator. Elvenavnet ble «Brandrud», for å unngå særnorske bokstaver, og *reach* ble «main».

I utgangspunktet ble det tegnet inn flere sideelver med samme elvenavn, men med unike navn på *reach*. Opprinnelig ble også elvenettverket tegnet inn hele veien opp, men jeg hadde hver gang støtt på problemer under eller etter denne prosessen, selv etter flere forsøk på å digitalisere lagene på nytt. På grunn av alle problemene ble det besluttet å kun digitalisere hovedløpet til Brandrudsåa fra der de to øverste sideelvene møtes, rett før elva krysser fylkesvei 407 første gang. Denne beslutningen ble tatt for å spare tid, og fordi jeg regnet med at vannføringen er ganske liten øverst vassdraget. I tillegg er det ingen bebyggelse og lite infrastruktur der. Beslutningen ble også tatt på bakgrunn av råd fra Knut Alfredsen, professor i hydrologi ved NTNU i Trondheim, som i en personlig e-postkorrespondanse (28. februar 2018) mente det ikke ville være nødvendig å tegne inn hele elveløpet. Dette fordi vannstanden allerede er utregnet av NEVINA.

### 4.3.3 Elvebanker (banks) og strømningslinjer (flow path centerlines)

Linjer for å angi elvebanker brukes til å skille områdene hvor hovedstrømmen i elva går fra områdene med flomsedimenter i elveslettene: sedimenter avsatt av elva når vannføringen er unormalt høy (Finne, 2018). Dette laget er ikke obligatorisk, men en definering av hovedkanalen vil gi HEC-RAS bedre informasjon om terrenget, bevegelsesmønsteret til vannet i elvesletta og identifisering av områder med lite sedimenttransport. Laget trenger heller ikke være kontinuerlig, og det finnes verktøy for å endre på bankpunktene i tverrsnittene i HEC-RAS. Bankpunktene (*bank station points*) er der linjene krysser tverrsnittene (Ackerman, 2012). SFKB-dataene inneholdt linjer som definerer elvebanker, men de var kun digitalisert helt nederst i vassdraget, sannsynligvis på grunn av at elva er ganske liten. Linjene valgte jeg derfor å tegne inn selv, men siden Brandrudsåa renner gjennom et generelt kupert terreng var det vanskelig å tegne linjene nøyaktig. På grunn av usikkerhet knyttet til plasseringen av linjene ble veldig mange bankpunkter kontrollert og redigert i HEC-RAS senere.



Figur 4-7: Banklinjer i rødt, elvelinja i blått, tverrsnitt i grønt, strømningslinjer i gult.

Strømningslinjer (*flow path centerlines*) brukes til å bestemme lengden nedstrøms (*downstream reach lengths*) mellom hvert tverrsnitt i hovedkanalen og elvebankene. En strømningslinje skal tegnes i massesentrumet til strømmen i hovedkanalen, venstre elvebank og høyre elvebank (Ackerman, 2012).

Når digitaliseringen av laget startes, vil programmet spørre om man ønsker å legge til strømningscenterlinjen der elvenettverket allerede er digitalisert. Dette er den samme linja som er forklart i delkapittel 4.3.2. Etter å ha takket ja til dette skal strømningslinje i venstre og høyre elvebank tegnes inn. SFKB-dataene inneholdt ingen linjer som anga strømninger i elveslettene, så linjene måtte digitaliseres. Plasseringen av de var vanskelig, da jeg forstod det som at linjene skal tegnes inn der det allerede er vannføring ved normal vannstand ut fra manualen skrevet av Ackerman (2012, side 8-10):

*A flow path line should be created in the center-of-mass of flow in the main channel, left overbank, and right overbank for the water surface profile of interest. [...] digitize the overbank flow paths in the downstream direction, following the movement of water.*

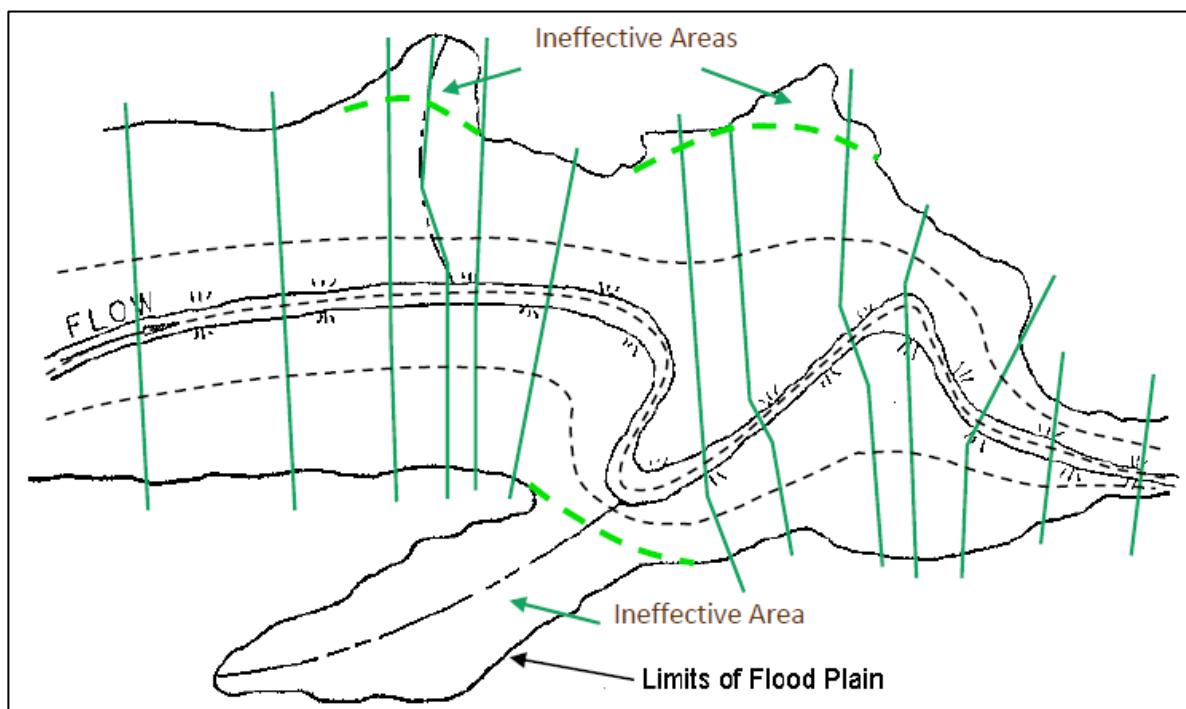
Samtidig ser ikke dette ut til å være tilfellet i illustrasjonen han legger ved, vist i Figur 4-8. En ser at vassdraget han jobbet med har en tydeligere definert elveslette enn Brandrudsåa, noe som bidro til å gjøre meg enda mer usikker på hvor venstre og høyre strømningslinje skulle tegnes inn. Ut fra andre illustrasjoner i samme manual så jeg også at de ble tegnet på utsiden av elvebankene. Jeg valgte dermed å forstå det som at disse ikke skulle tegnes inn der det er vannføring ved vanlig vannstand, men heller der elvebankene potensielt kan være ved flomhendelser. Et eksempel fra analysen ses i Figur 4-7, der venstre og høyre strømningslinje er i gult og senterlinjen ligger under den blå elvelinjen i midten.



Figur 4-8: Eksempel på plassering av strømningslinjer hentet fra Ackerman (2012) side 8-11.

#### 4.3.4 Tverrsnitt (cross-sectional cut lines)

Tverrsnittlinjer brukes til å definere stedene hvor tverrsnittsdata skal ekstraheres fra DTM-en. Hvor tverrsnittene og de andre RAS-lagene krysser hverandre vil bestemme beliggenheten til elvebankpunkter (*bank station points*), nedstrøms lengde mellom tverrsnittene (*downstream reach lengths*), ineffektiv strømming (*ineffective flow areas*), blokkeringer (*blocked obstructions*), Mannings *n*-verdier og elvevoller. Tverrsnitt skal alltid tegnes inn loddrett i forhold til strømningsretningen fra venstre til høyre banke og dekke hele elvesletten (Ackerman, 2012).



Figur 4-9: Eksempel på oppsett av tverrsnitt, opprinnelig fra Brunner (2016) side 3-6.

Tverrsnitt er plassert i varierende intervaller nedover elveløpet slik at forskjellige karakteristika ved transporteringsveien til strømmen og elvesletten kommer frem. Det betyr at de bør tegnes inn langs hele elveløpet, spesielt der det oppstår forandringer i sedimentavsetning, helningsgradient, form eller ruhet, samt ved starten og slutten til strukturer, som for eksempel bruer. Der det oppstår brå forandringer bør det tegnes inn flere tverrsnitt, uavhengig av distanse. Avstanden mellom tverrsnittene er også en funksjon av størrelsen på elva og hvor likeformet formen på tverrsnittene er. Generelt vil store flate elver kreve færre tverrsnitt enn små bratte elver (Brunner, 2016). Eksempel på plassering av tverrsnitt vises i Figur 4-9. I manualen angir ikke Brunner noen andre, mer håndfaste anbefalinger om distansen mellom tverrsnitt. De digitaliserte tverrsnittene har derfor i snitt en distanse på ca. 20 til 30 meter mellom seg, for å prøve å få med så mange forandringer i elva

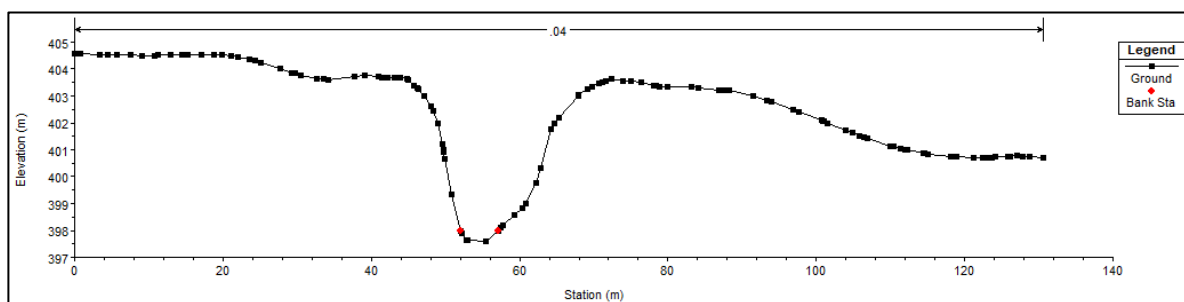


som mulig uten å befolke elveløpet med for mange tverrsnitt. I tillegg er det tverrsnitt umiddelbart før og etter stikkrenner, som forklart i delkapittel 4.4.1.1.

Hvert tverrsnitt blir identifisert med en *river-*, *reach-* og *river station-*identifikator.

Tverrsnittet blir beskrevet med stasjons- og høydedata fra venstre til høyre sett nedstrøms.

*River station-*identifikatoren nummererer tverrsnittet, der nummereringssystemet korresponderer med plasseringen langs elvekanalen. Nummereringssystemet må være sammenhengende, siden HEC-RAS antar at høyere tall er oppstrøms og lavere tall er nedstrøms. I selve tverrsnittet vil hvert datapunkt tildeles et stasjonsnummer som korresponderer med den horisontale distansen fra venstre til høyre, med maksimalt 500 stasjoner. Stasjoner brukes til å identifisere hvor i tverrsnittet forskjellige objekter og terrengforandringer ligger. Den horisontale akse (x-aksen) i Figur 4-10 viser stasjonsnummer for punktene som ligger langs et tverrsnitt. Stasjonsnummer 0 ligger helt på venstre side, og stasjonsverdien øker i sammenheng med distansen fra venstre mot høyre (Brunner, 2016).



Figur 4-10: Stasjoner (svarte firkanter) og bankstasjoner (røde firkanter) langs høydeprofilen for et tverrsnitt.

Andre data som også kreves er for eksempel nedstrøms lengde mellom tverrsnittene, ruhekkoeffisienter, og kontraksjons- og ekspansjonskoeffisienter. Nedstrøms lengde blir bestemt for hovedkanalen, og venstre og høyre elvebank, med strømningslinjene som grunnlag for beregningene (Brunner, 2016).

#### 4.3.4.1 Energitapskoeffisienter

Programmet bruker flere typer koeffisienter for å beregne energitap: (1) Mannings  $n$ -verdier, (2) kontraksjons- og ekspansjonskoeffisienter for å vurdere overgangstap, og (3) tapskoeffisienter for bruer og stikkrenner.

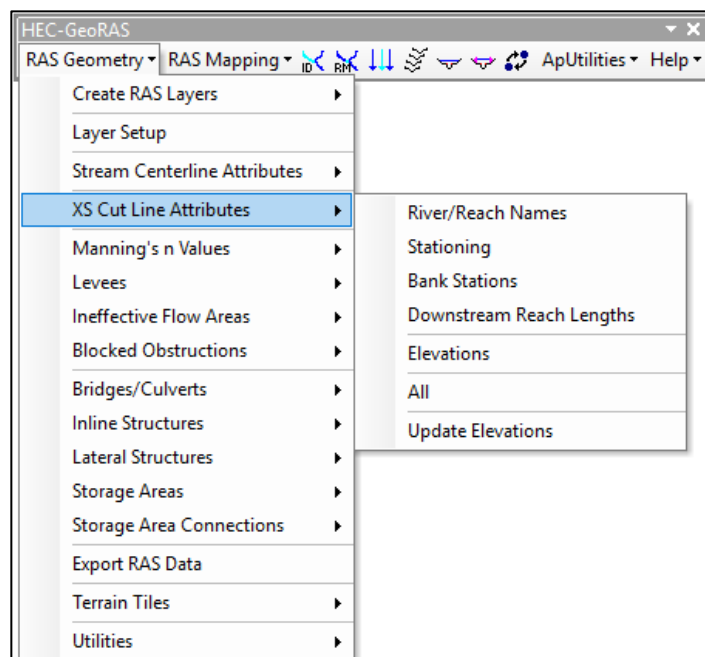
Valg av riktig Mannings  $n$  er viktig for beregningen av vannstanden. Verdien av Mannings  $n$  avhenger av mange forskjellige faktorer, blant annet ruheten til overflaten, vegetasjon, irregulariteter i kanalen, og størrelsen og formen til kanalen. Jeg vil bruke verdiene foreslått av Chow (1959) i boken *Open-channel hydraulics*. Andre metoder for beregning av

ruhetskoeffisienter finnes, men de metodene krever mer inngående kunnskap og målinger av elvekanalene enn det jeg besitter, slik som  $n$ -verdier basert på hvordan sammensetningen av bunnmateriale i elva er, formen til elvekanalen, obstruksjoner, vegetasjon, strømningsforhold og faktor for korrigerende av meanderingen til elva. Å beregne  $n$ -verdier ut fra dette er tidkrevende, med tanke på at det må gjøres målinger i elva. I tillegg besitter jeg ikke nok kunnskap om hvordan  $n$ -verdier kan beregnes ut fra slike parametere fra før. Derfor, med hensyn til tid og effektivitet, vil jeg bruke verdiene foreslått av Chow. Brunner (2016, side 3-13) anbefaler også å bruke disse verdiene når man ikke sitter på egne målinger av elva.

Kontraksjon eller ekspansjon i elva på grunn av endringer i tverrsnittene er en vanlig årsak til energitap mellom to tverrsnitt. Når dette skjer vil tapet kalkuleres ut fra kontraksjons- og ekspansjonskoeffisientene som er en del av dataene til tverrsnittet oppstrøms. Koeffisientene er multiplisert med differansen i hastighet mellom tverrsnittene (vist i Figur 3-8). De samme beregningene ligger til grunn for kalkulering av energitap ved bruer og stikkrenner, men består av flere deler. Dette vil bli forklart nærmere i delkapittel 4.4.1 under kapitlet om bruer og stikkrenner (Brunner, 2016).

#### 4.3.4.2 Tegning og attribuering av tverrsnitt

For digitaliseringen av tverrsnittene brukes linjeverktøyet i *edit* i ArcMap. Når tverrsnittene er laget kan man begynne å attribuere dem. Med attribuering menes tildeling av egenskaper til tverrsnittene, slik som for eksempel nedstrøms lengde mellom tverrsnitt og stasjonering. Attribuering skjer automatisk i HEC-GeoRAS når en velger de forskjellige verktøyene i menyen *XS cut line attributes*, som vist i Figur 4-11. *River/reach names*



Figur 4-11: Meny for attribuering av tverrsnitt.

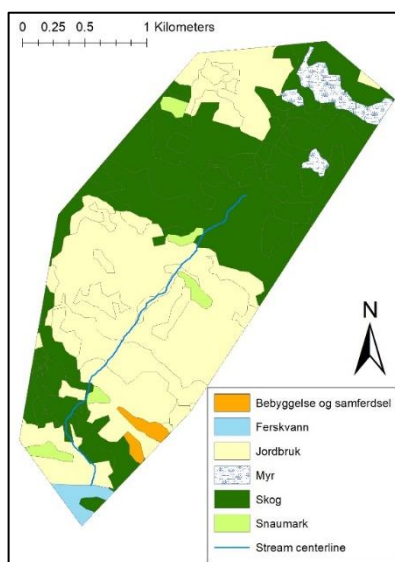
angir i hvilken elv tverrsnittene ligger. *Stationing* angir *river station* – plasseringen til tverrsnittene langs elveløpet i forhold til hverandre – og stasjoneringen langs lengde- og høydeprofilen til tverrsnittet, som ses i Figur 4-10. *Bank stations* angir hvor banklinjene

krysser tverrsnittet i lengdeprofilen. *Elevations* tildeler tverrsnittene høydedata ( $z$ -verdier) ekstrahert fra terrenngmodellen (Ackerman, 2012).

#### 4.3.5 Blokkeringer (blocked obstructions)

Blokkeringer brukes til å fjerne strømningsområder fra tverrsnitt, og kan representere store bygninger bygget innenfor elvesletten. Bygninger vises gjerne ikke i DTM-en fra før, og blokkeringer digitaliseres som polygoner. Når de er ferdig tegnet ekstraherer man posisjonen slik at det kan brukes i HEC-RAS (Ackerman, 2012). Høyden til bygningene legges inn i HEC-RAS.

#### 4.3.6 Arealbruk (land use)



Figur 4-12: Arealbrukskartet bygget på AR50.

Arealbrukslaget er et polygondatasett som brukes til å etablere ruhetskoeffisienter for tverrsnittene. Her er det mulig å bruke et eksisterende polygonsett, eller tegne et nytt selv. Jeg hadde fått tak i datasettet AR50 fra Norsk Institutt for Bioøkonomi (NIBIO) og valgte dermed å bruke dette. AR50 er et datasett tilpasset målestokk 1:20 000 til 1:100 000 som viser arealbruken i Norge. Kartene er en generalisering av AR5 (et mer detaljert arealbrukskart) og tolkning av satellittbilder over tregrensa. Områder som er mindre enn 15 dekar vises ikke som enkeltstående kartfigurer, men slås sammen med andre (NIBIO, 2018a).

Det var ingen ruhetskoeffisienter i dette datasettet, så jeg måtte derfor legge inn det selv. Til å begynne med la jeg til polygonsettet i ArcMap. For å bygge et arealbrukssett med ruhetskoeffisienter måtte det først lages en ny *string*-kolonne i attributtabelen til datasettet. AR50 kommer med en kategorisering av arealbrukstypene, men dette er heltallskolonnen *ARTYPE* som ikke har en tekstforklaring av de forskjellige arealtypene som HEC-GeoRAS krever. Den nye kolonnen

ARTYPE	ARVEGET	BONITET	ROUTE_ID	SL	SDEID	SSBID	LandUse
10	98	14	21	751502	2200000680000		BebyggelseSamferdsel
10	98	14	21	751578	2200000680000		BebyggelseSamferdsel
20	98	1	21	750531	2200000680000		Jordbruk
20	98	1	21	751267	2200000680000		Jordbruk
20	98	1	21	750116	2200000680000		Jordbruk
20	98	1	21	753049	2200000680000		Jordbruk
20	98	1	21	751680	2200000680000		Jordbruk
20	98	1	21	751057	2200000680000		Jordbruk
20	98	2	21	750026	2200000680000		Jordbruk
20	98	2	21	750756	2200000680000		Jordbruk
20	98	2	21	750910	2200000680000		Jordbruk
20	98	2	21	751021	2200000680000		Jordbruk
20	98	2	21	749824	2200000680000		Jordbruk
20	98	2	21	751045	2200000680000		Jordbruk
20	98	2	21	749757	2200000680000		Jordbruk
20	98	2	21	751391	2200000680000		Jordbruk
20	98	2	21	751444	2200000680000		Jordbruk
20	98	2	21	750478	2200000680000		Jordbruk
20	98	2	21	750516	2200000680000		Jordbruk
20	98	2	21	749932	2200000680000		Jordbruk
20	98	2	21	751445	2200000680000		Jordbruk
20	98	2	21	751044	2200000680000		Jordbruk
20	98	2	21	750489	2200000680000		Jordbruk
20	98	1	21	750684	2200000680000		Jordbruk
20	98	1	21	749750	2200000680000		Jordbruk
20	98	1	21	750930	2200000680000		Jordbruk
30	98	6	21	750208	2200000680000		Skog
30	98	6	21	750133	2200000680000		Skog
30	98	6	21	750412	2200000680000		Skog
30	98	6	21	749898	2200000680000		Skog
30	98	6	21	750088	2200000680000		Skog
30	98	5	21	750309	2200000680000		Skog
30	98	5	21	750026	2200000680000		Skog

Figur 4-13: Utsnitt av attributtabelen til arealbruksdataene. *ARTYPE* til venstre, og *LandUse* er lagt til som ny kolonne til høyre.

ble kalt *LandUse*. Innenfor studieområdet er det seks forskjellige *ARTYPE*: 10 = bebyggelse og samferdsel, 20 = jordbruk, 30 = skog, 50 = snaumark, 60 = myr, og 81 = ferskvann (NIBIO, 2018b).

#### 4.3.6.1 Mannings *n*-verdier

Etter at alle polygonene hadde fått tildelt en *LandUse*-kode la jeg til en ny tabell gjennom *RAS geometry* kalt *LUManning*. Dette er en tabell som samler alle polygoner med lik arealbruk sammen og gjør at det kan testes inn én enkelt *n*-verdi per arealbrukstype. Som sagt tidligere vil jeg bruke verdier beregnet av Chow (1959). Problemet er at ikke alle verdier er like enkle å fastslå, siden det finnes små forskjeller innad i forskjellige arealbrukstyper. Det var derfor knyttet stor usikkerhet til hvilke verdier som skulle brukes. Arealbrukstypene myr og ferskvann var spesielt utfordrende, siden ingen av Chows beskrivelser passet noen av dem. Etter noe diskusjon, resonnering og søk etter referanser kom jeg frem til verdiene som skulle brukes. Verdiene vises i Tabell 4-1. Alle verdiene er hentet fra kolonnen for normal strømning i Chows liste. Grunnen til at normal strømning ble valgt er fordi det ikke sto beskrevet hva som er forskjellen mellom minimal, normal og maksimal strømning, så for å unngå både under- og overdrivelser i verdiene falt valget på normal strømning.

Tabell 4-1: Oversikt over Mannings *n*-verdier for hver arealbrukstype med Chows beskrivelse som referanse.

Arealbruk	Beskrivelse i Chow	Mannings <i>n</i>
Samferdsel og bebyggelse	Rough asphalt	0,016
Jordbruk	Mature field crops	0,040
Skog	Heavy stand of timber, few down trees, little undergrowth, flow below branches	0,100
Snaumark	Cleared land with tree 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

Når verdiene er bestemt lages en ny tabell som ekstraherer *n*-verdier for hvert tverrsnitt. Ved hjelp av verktøyet *extract n values* blir det laget en tabell kalt *Manning* som inneholder all denne informasjonen. For de tverrsnittene som består av flere *n*-verdier blir plasseringen for endringen av verdiene vist som en fraksjon (Ackerman, 2012).

LUManning				Manning			
OBJECTID *	LUCode	N Value	LandUse	OBJECTID *	XS2DID	Fraction	N Value
1	<Null>	0.016	BebyggelseSamferdsel	157	344	0	0.1
2	<Null>	0.04	Jordbruk	158	345	0	0.1
3	<Null>	0.1	Skog	159	346	0	0.1
4	<Null>	0.04	Snaumark	160	346	0.56205	0.04
5	<Null>	0.1	Myr	161	346	0.87972	0.1
6	<Null>	0.04	Ferskvann	162	347	0	0.1

Figur 4-14: Tabellene «LUManning» til venstre og «Manning» til høyre.

### 4.3.7 Andre lag og eksport til HEC-RAS

Andre lag som kan tegnes inn er flomvoller, områder med ineffektiv strøm (*ineffective flow areas*), bruer og kulverter, innebygde strukturer (*inline structures*), laterale strukturer, og opphopningsområder (*storage areas*). Flomvoller, innebygde strukturer og laterale strukturer finnes så vidt jeg vet ikke i området, i det minste ikke i stor skala, og jeg følte derfor ikke at det var noe behov for å tegne dem inn. Opphopningsområder kan være innsjøer, ofte sammen med innebygde- eller laterale strukturer, som for eksempel demninger (Ackerman, 2012). Det finnes små innsjøer i nedbørsfeltet til Brandrudsåa, men disse ble ikke tegnet inn fordi jeg antok at NEVINA allerede hadde tatt dem med i beregningene for vannføring. Denne antakelsen ble basert på råd fra Knut Alfredsen, professor i hydrologi ved NTNU i Trondheim (personlig e-postkorrespondanse, 28. februar 2018).

Ineffektiv strøm oppstår på steder der vannets strømning og transporteringssevne synker. Ofte skjer dette i sammenheng med bruer og stikkrenner, på begge sider av både åpningen og utløpet (Ackerman, 2012). Dette valgte jeg også å se bort fra. Grunnen var både fordi jeg var usikker på hvor polygonene skulle tegnes inn - og dermed potensielt ødelegge resultatene mer ved å tegne dem inn enn å la være, samt at vassdraget er såpass lite at de ineffektive strømningsområdene antakeligvis er veldig små. Bruer og stikkrenner lot jeg være å tegne inn i HEC-GeoRAS, for heller å legge inn dataene for de i HEC-RAS senere. Begrunnelsen for dette valget forklares i delkapittel 6.2.2.

Etter at alle lagene er tegnet og blitt tilskrevet attributter eksporteres de til et filformat som kan leses av HEC-RAS. Ved genereringen velger man hvilken terrengmodell, og hvilke påkrevde og valgfrie lag, som skal brukes. Det er derfor mulig å utelukke lag for prosessering.

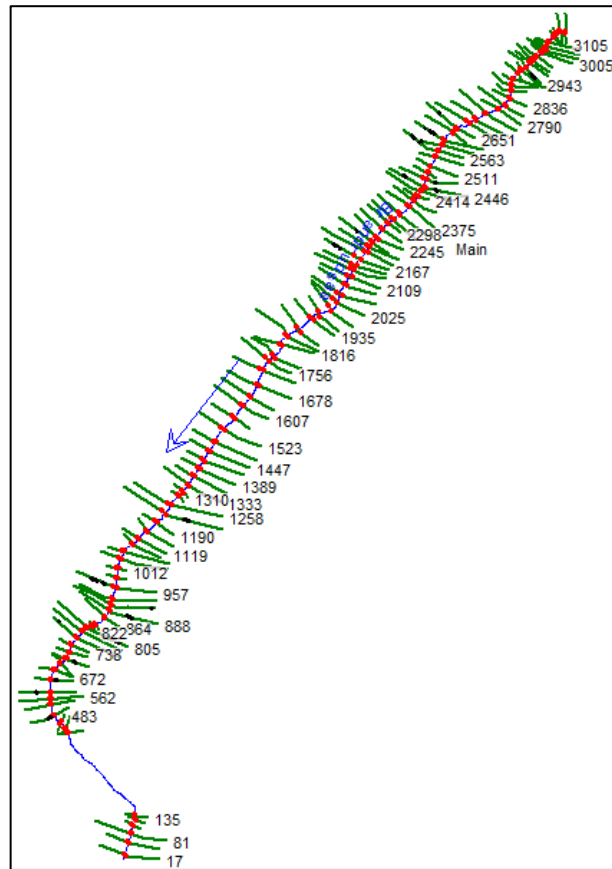
## 4.4 HEC-RAS

Inne i HEC-RAS hentes først inn importfilen som ble laget med HEC-GeoRAS. I dataimportøren er det mulighet for å velge hvilke data som skal importeres, samt gjøre små endringer. I HEC-RAS er engelske enheter standard, men inne i dataimportøren er det mulig å velge enheten dataene skal importeres med. Her ble metriske enheter valgt, siden alle data brukt i oppgaven er angitt i det metriske systemet. Videre er det mulig å velge hvilke elver og sideelver, og til og med hvilke tverrsnitt som skal importeres. Jeg fulgte Ackerman (2012) sin manual og gjorde ingen endringer annet enn at sifrene som angir *river station* – det som bestemmer hvor tverrsnittene ligger langs elveløpet – ble rundet av fra tall med to

desimaler til heltall. Prosjeksjonen skal i utgangspunktet være den samme som terrenngmodellen. Videre ble antall stasjoner filtrert ned til 100 per tverrsnitt, etter anbefaling fra manualen. Det står ingen videre begrunnelse til hvorfor dette gjøres, men det er antakelig for å forbedre prosesseringstiden. Han forklarer også at 100 stasjoner uansett er mer enn nok for å oppnå et tilfredsstillende resultat. Etter filtreringen ble det angitt bankstasjoner på tverrsnittene som ikke krysset med banklinjene jeg hadde lagt inn i HEC-GeoRAS, forklart i delkapittel 4.3.3. I tillegg så jeg over og redigerte de eksisterende bankpunktene. Her så jeg på profilene til tverrsnittene (som i Figur 4-10) og gjorde et estimat på hvor elvebanken kunne ligge. Det er også denne arbeidsmåten som anbefales av Ackerman (2012).

### 4.4.1 Bruer og stikkrenner

Bruer og stikkrenner ble lagt inn i HEC-RAS, istedenfor å tegne de inn med HEC-GeoRAS. Begge strukturene behandles likt i beregningene, så fremgangsmåten for de to er den samme

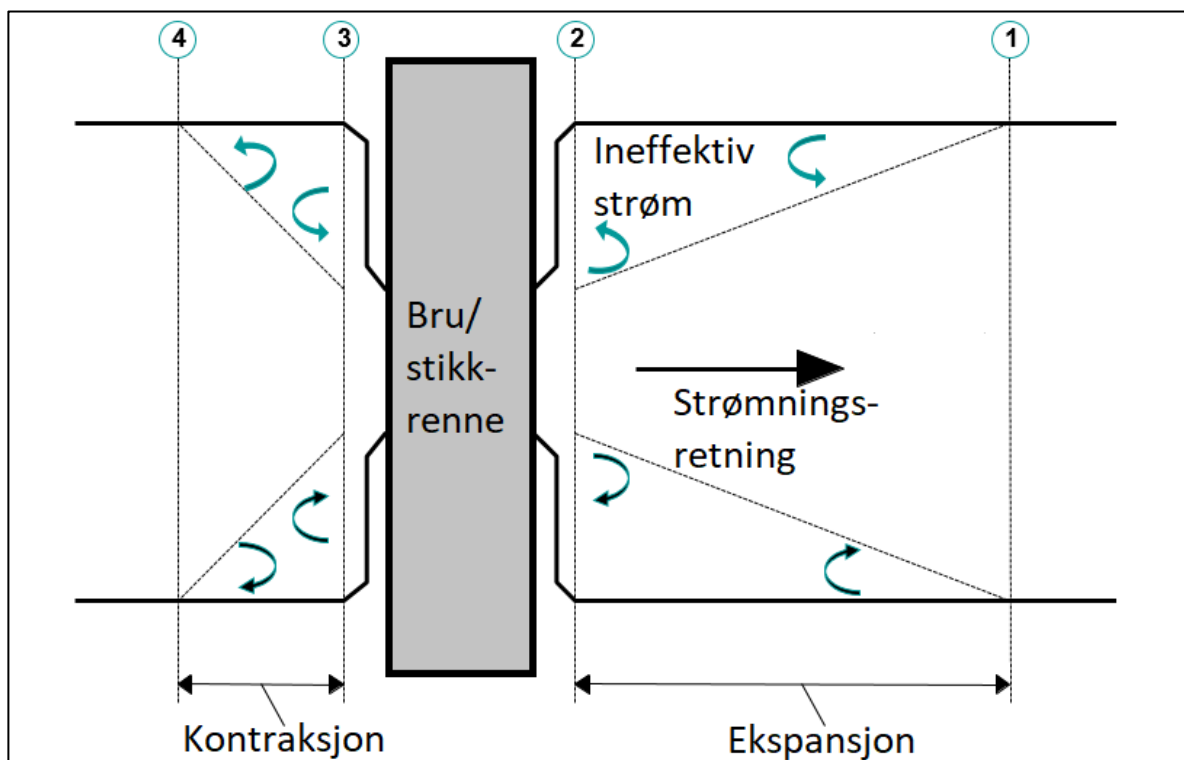


Figur 4-15: Geometriske data etter import. Tallene ved tverrsnittene (i grønt) angir river station.

(Ackerman, 2012). Før jeg forklarer modelleringen av dem vil beregningen av energitap og plasseringen av tverrsnitt rundt strukturene bli presentert.

HEC-RAS beregner energitap skapt av bruer og stikkrenner i tre deler. En del omhandler energitap som oppstår umiddelbart nedstrøms fra strukturen hvor en ekspansjon av strømmen vanligvis er til stede. Den andre delen er tapene i selve strukturen, og den tredje delen består av energitap som oppstår i elva umiddelbart oppstrøms for strukturen, der en kontraksjon av strømmen som regel oppstår for å komme inn i åpningen (Brunner, 2016).

#### 4.4.1.1 Plassering av tverrsnitt

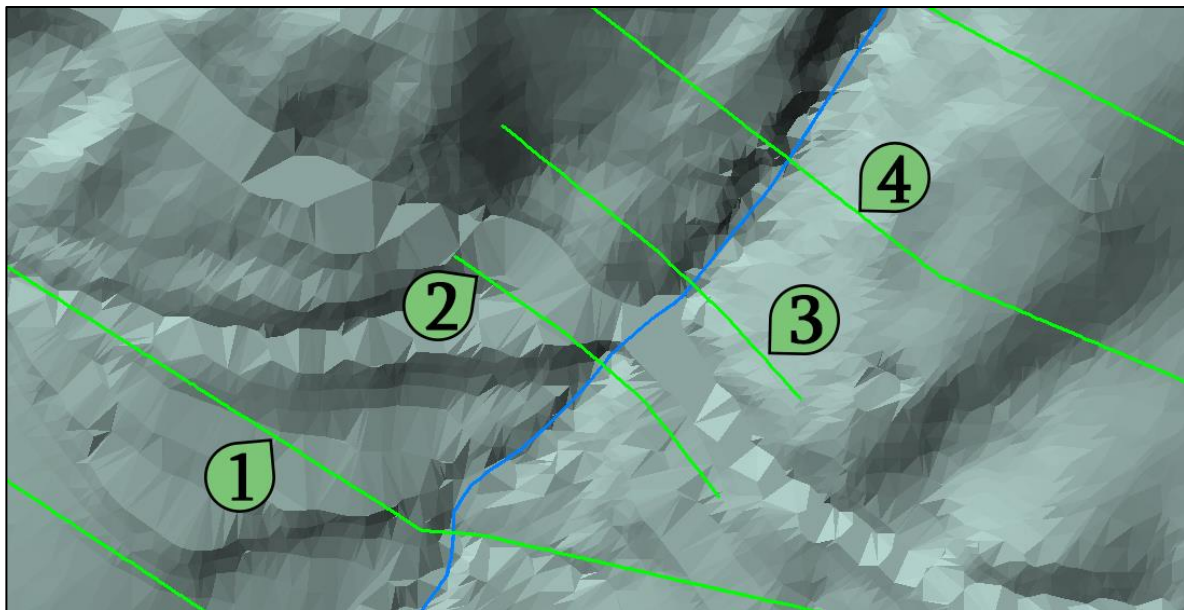


Figur 4-16: Plassering av tverrsnitt 1, 2, 3 og 4 rundt strukturen. Modifisering av figur hentet fra CivilGEO (2018).

For beregning av energitap på grunn av bruer og stikkrenner bruker programmet fire brukerdefinerte tverrsnitt. Under beregningene vil programmet automatisk legge inn to tverrsnitt inne i strukturen. Figur 4-16 viser en oversikt over hvor plasseringen av de brukerdefinerte tverrsnittene 1, 2, 3 og 4 bør være i forhold til strukturen. Brunner (2016) forklarer plasseringene slik:

- Tverrsnitt 1:* Plasseres langt nok nedstrøms fra strukturen så strømmen ikke lenger er påvirket av den, altså er fullt ekspandert. Denne distansen burde bestemmes gjennom feltundersøkelser når det er høy vannføring, men det er høyst usannsynlig at man får observert dette under prosjektarbeidet. Jeg gjorde derfor et estimat basert på terrengmodellen der elvekanalen så ut til å være like bred som den var oppstrøms, og derfor regnet med den var fullt ekspandert. Et eksempel fra analysen kan ses i Figur 4-17.
- Tverrsnitt 2:* Plasseres en kort distanse nedstrøms fra strukturen. Dette tverrsnittet bør plasseres der elvebunnen og sletta er naturlig, altså utenfor strukturen. Den skal ikke plasseres umiddelbart nedstrøms etter utgangen til brua eller stikkrenna (for eksempel 0,5 meter nedenfor), men langt nok ned til at noe strømmingsekspanasjon har forekommet.
- Tverrsnitt 3:* Plasseres en kort distanse oppstrøms fra strukturen. Distansen opp til tverrsnitt 3 bør reflektere lengden som kreves for å dekke den brå akselerasjonen og kontraksjonen av strømmen når den entrer åpningen til brua eller stikkrenna. Likt tverrsnitt 2 skal den ikke plasseres umiddelbart ovenfor inngangen, siden beregningene tar seg av kontraksjons- og ekspansjonstapene som skjer ved inngangen og utgangen.
- Tverrsnitt 4:* Plasseres oppstrøms der strømningslinjene er parallelle og strømmen er effektiv. Generelt skjer kontraksjon over en kortere distanse enn ekspansjon. Likt tverrsnitt 1 bør plasseringen bestemmes av feltundersøkelser ved høy vannføring, men jeg gjorde et estimat basert på samme metode som ved tverrsnitt 1. Samtidig så ble det estimert at i et så lite vassdrag vil denne distansen være ganske kort uansett.





Figur 4-17: Plassering av tverrsnitt rundt ei stikkrenne i Brandrudsåa. Tallene korresponderer til nummereringen i Figur 4-16.

For hydrologiske beregninger vil programmet automatisk formulere to tverrsnitt inne i strukturen. Geometrien inne i brua eller stikkrenna er en kombinasjon av de tilstøtende tverrsnittene (2 og 3) og strukturgeometrien. Strukturgeometrien består av brudekket, landkar og eventuelle pilarer. Tverrsnitt 2 og nedstrøms strukturgeometri brukes til å bestemme geometrien inne i strukturen på nedstrømsiden, tverrsnitt 3 og oppstrøms strukturgeometri er da med på å bestemme dette for oppstrømsiden (Brunner, 2016).

#### 4.4.1.2 Kontraksjons- og ekspansjonstap

Som vist i Figur 4-16 vil strømningskontraksjon oppstå mellom tverrsnitt 4 og 3, mens ekspansjon forekommer mellom tverrsnitt 2 og 1. Kontraksjons- og ekspansjonskoeffisientene brukes til å beregne energitap assosiert med forandringer i formen til elvekanalen. Tapene på grunn av ekspansjon er vanligvis større enn de ved kontraksjon. Jeg benyttet koeffisienter som Brunner (2016) mener er typiske verdier: 0,1 for kontraksjon og 0,3 for ekspansjon.

#### 4.4.1.3 Modellering

For å modellere bruer og stikkrenner i HEC-RAS åpnet jeg først *view/edit geometric data*. Her har man valget om å redigere flere geometriske data, blant annet bruer og stikkrenner ved å trykke på *brdg/culv*. Dette åpner redigeringsverktøyet for bruer og stikkrenner. Siden de ikke ble digitalisert i ArcMap/HEC-GeoRAS må de legges inn her. I elveløpet er det totalt 11 stikkrenner som skal modelleres. Inne i redigeringsverktøyet velger jeg *options* og *add a bridge and/or culvert*. Det første som gjøres her er å velge *river station*. Som nevnt tidligere angir *river station* stedet langs elveløpet tverrsnitt skal plasseres. Første stikkrenne som skal

legges inn er plassert mellom tverrsnittene med *river station 3073* (oppstrøms) og *3063* (nedstrøms), helt øverst i det digitaliserte elveløpet. *River station* må derfor være en vilkårlig verdi mellom disse to. Hadde det vært flere *rivers* og *reaches* måtte dette ha blitt valgt samtidig, så programmet vet hvilken elv den skal plasseres i. HEC-RAS viser nå profilene til tverrsnittene oppstrøms og nedstrøms for strukturen som skal modelleres inne i redigeringsverktøyet for bruer og stikkrenner.

### Brudekket

I *deck/roadway* angis informasjon om brudekket. Det var ikke gjort målinger av veien på noen av punktene, fordi det enda ikke var bestemt at HEC-RAS skulle brukes som metode under feltundersøkelsene. Derfor er dataene som er lagt inn her basert på målinger i [norgeskart.no](http://norgeskart.no) og verdier fra eksempler i *Applications guide* av Brunner et al. (2016). Her kan verdier som bestemmer distansen fra brudekket til oppstrøms tverrsnitt, bredden til brudekket og formen til brudekket legges inn. Formen er enten *broad crested* eller *ogee*. *Broad crested* er «vanlig» form, mens *ogee* har en liten topp på midten. Alle stikkrennene i studieområdet er *broad crested*. I tillegg kan det legges inn informasjon om:

- *Weir coef*: Angir koeffisienten til brudekket hvis elva strømmer over veien. Her var det vanskelig å finne ut korrekt verdi, så jeg valgte å bruke standardverdien på 1,4.
- *Upstream station & high chord*: Angir lengden til oppstrømssiden av brudekket mot oppstrøms tverrsnitt, og høyden til brudekket angitt i moh.
- *Downstream station & high chord*: Samme som forrige, bare for nedstrømssiden.
- *U.S & D.S embankment side slope*: Angir helningsgraden til grøftkanten opp- og nedstrøms i en 1:X skala (vertikal:horisontal). Jeg hadde ingen målinger av dette, så denne verdien ble satt til 2 på alle stikkrennene basert på eksempelet i *Applications guide*.

Distance	Width	Weir Coef
11.5	7	1.4

Upstream			Downstream		
Station	high chord	low chord	Station	high chord	low chord
1 0.	752.5		0.	752.5	
2 47.78	754.5		47.78	754.5	
3					
4					
5					
6					
7					
8					

U.S Embankment SS: 2      D.S Embankment SS: 2

Weir Data  
 Max Submergence: 0.98      Min Weir Flow El:   
 Weir Crest Shape  
 Broad Crested  
 Ogee

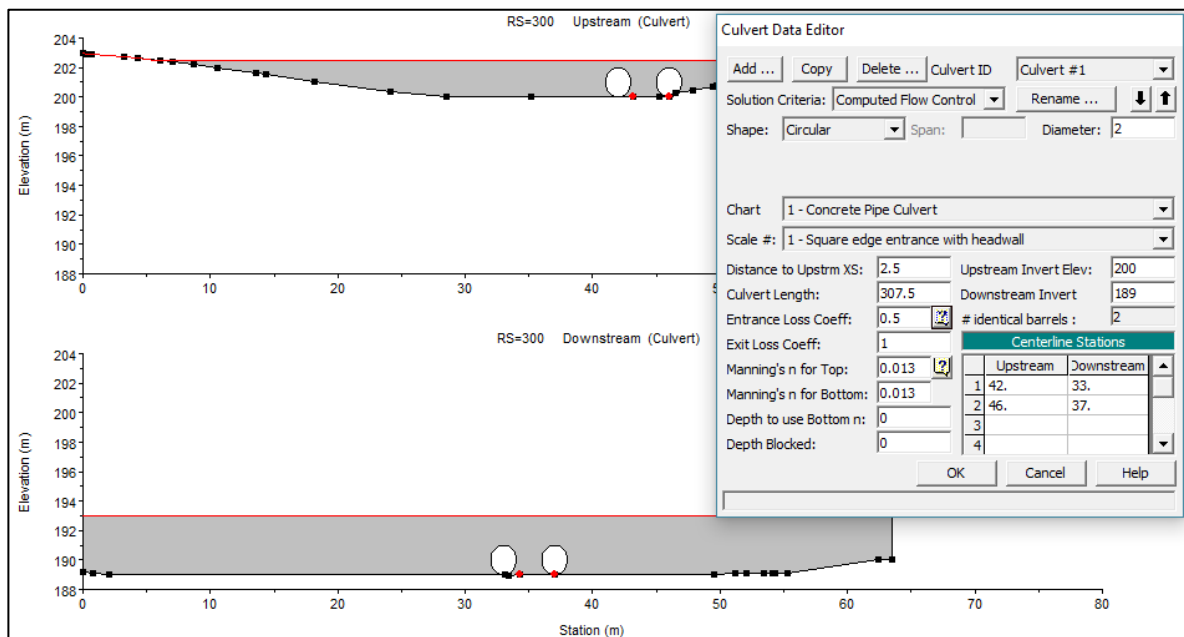
OK      Cancel

Enter distance between upstream cross section and deck/roadway. (m)

Figur 4-18: Informasjon om brudekket angitt for den første stikkrenna. Distance, width, og upstream/ downstream station og high chord var de eneste verdiene som ble endret på fra en stikkrenne til en annen.

Videre kan man taste inn verdier for *maximum allowable submergence ratio* og *minimum weir flow elevation*. Den første brukes kun i bruanalyser og vil derfor ikke bli brukt i denne analysen, så standardverdien er uendret. Den siste angir høyden som må overstiges for at strømming over veien skal oppstå, men hvis denne er blank vil den bruke høyden til oppstrømsiden av brudekket (Brunner et al., 2016).

### Stikkrenna

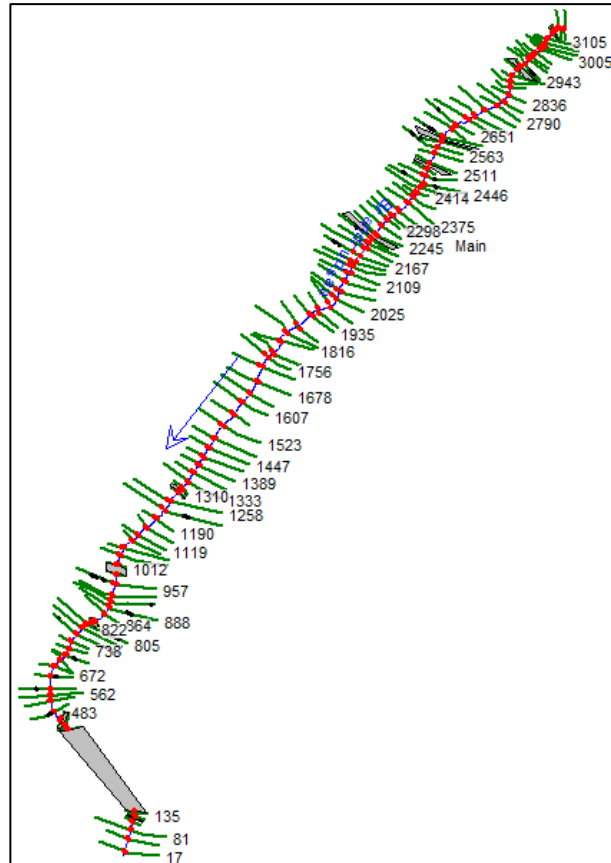


Figur 4-19: Det er også mulig å legge inn flere enn ett rør. Illustrasjon av de modellerte stikkrennene med redigeringsverktøyet for stikkrenner til høyre. Profilen for siden oppstrøms øverst og nedstrøms nederst. Legg merke til at det grå feltet med rød linje øverst bestemmes av brudekket jeg har angitt informasjon om tidligere.

Informasjon om stikkrenna legges til i *culvert*. Jeg hadde gjort målinger av noen stikkrenner fra feltundersøkelsene, men som forklart i delkapittel 4.1 ble ikke det gjort av alle.

Stikkrennene uten ordentlige målinger ble estimert ut fra de dataene som eksisterte for de andre stikkrennene. For den nederste stikkrenna fikk jeg hentet informasjon om dimensjonene fra NVDB av Statens Vegvesen (2018). Inne i *culvert* fikk jeg lagt inn informasjon om formen på stikkrenna – om den er firkantet eller sylindrerformet – samt diameter og eventuell høyde hvis den er firkantet. I tillegg legger man inn distansen fra åpningen til oppstrøms tverrsnitt og lengden til stikkrenna. Her legges det også inn energitapskoeffisienter ved inngangen og utgangen, samt Mannings  $n$ -verdi. Inngangskoeffisienten og Mannings  $n$  ble valgt etter manualen til Brunner (2016). Koeffisienten ved inngangen ble satt til 0,5 ved alle stikkrenner. Dette er verdien som passer betongrør med *square cut end of pipe* og *end*

*section conformed to fill slope*, som både kan stikke ut fra landmassen, være kuttet etter formen til landmassen eller med vegger som leder vannet inn i røret (se Vedlegg C). Mannings  $n$  ble satt til 0,013 på alle stikkrennene. Verdien er basert på *concrete culvert with bends, connections and some debris* under normal strømming (se Vedlegg B). Utgangskoeffisienten ble satt etter *Applications guide* av Brunner et al. (2016), der han mener at ved en plutselig ekspansjon er koeffisienten 1, men at den kan variere. Han kom ikke med noen videre informasjon om forskjellige verdier, så jeg fulgte derfor hans vurdering og satte denne verdien til 1 i alle stikkrennene. Til slutt legges det inn informasjon om høyde over havet, og stasjon for plassering langs tverrsnittene av inngangen og utgangen til stikkrenna. Her er det mulighet for å legge inn flere innganger/utganger enn kun én.



Figur 4-20: Stikkrennene (grå firkanter) lagt til i de geometriske dataene.

#### 4.4.2 Steady flow

Da alle stikkrennene var ferdig modellert begynte jeg med *steady flow*-modellering. Her laget jeg først 5 forskjellige strømningsprofiler, med verdier basert på de kalkulerte flomverdiene for 10-, 20-, 50-, 100- og 200-årsflom. Verdiene for flomtypene er angitt i  $\text{m}^3/\text{s}$  i Tabell 4-2, og er basert på beregninger frem til den lange stikkrenna som går under den nye E6. I tillegg laget jeg 3 nye *steady flow*-profiler med flomverdier på 4, 5 og 6  $\text{m}^3/\text{s}$  for å se hvor vannet går ved ekstremt høy vannføring, opprinnelig kun for å studere hvor store forskjeller det var. Det viste seg også i ettertid at disse verdiene ikke var så langt unna flomverdiene med klimapåslag når hele nedbørsfeltet er medregnet, så derfor er flomberegninger basert på verdiene tatt med i resultatene. Rapportene med flomverdiene for 10- til 200-årsflom finnes i Vedlegg D - Rapport fra NEVINA. Vedlegg E - Rapport fra NEVINA 2 viser rapporten for hele nedbørsfeltet. Når verdiene er lagt inn beregner HEC-RAS flomsonene (Brunner et al., 2016).

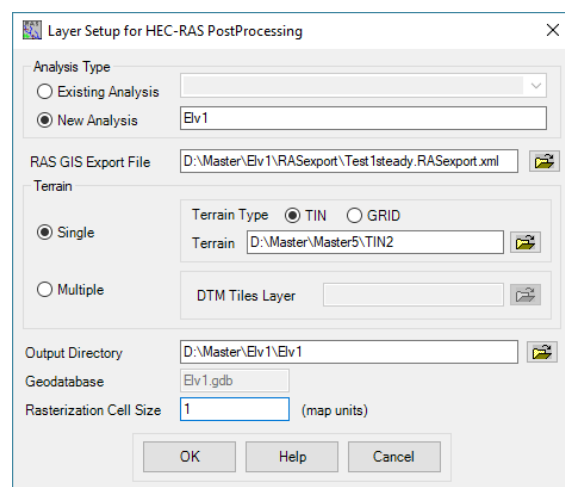
Tabell 4-2: Flomtyper med tilhørende verdier brukt i analysen.

Flomtype (-årsflom)	Verdier (i m <sup>3</sup> /s)	Klimapåslag (i m <sup>3</sup> /s)
10	1,7	3,4
20	1,9	4,0
50	2,4	5,0
100	2,8	5,8
200	3,2	6,7

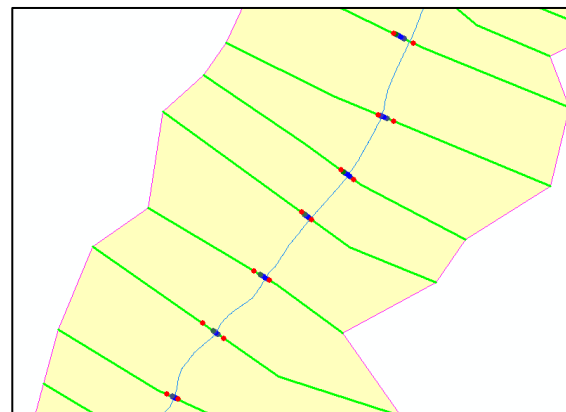
#### 4.4.3 Flomsonekartlegging

Etter at HEC-RAS har beregnet *steady flow* ble det først laget en eksportfil som blir hentet inn igjen i ArcMap gjennom HEC-GeoRAS. Etter at fila er konvertert til et filformat som kan leses av ArcMap, kjøres *layer setup* i RAS *mapping*-menyen i HEC-GeoRAS. Her velges navn på analysen, eksportfilen fra HEC-RAS, mappen resultatene skal lagres, cellestørrelsen til flomsonekartene og terrengmodellen som skal brukes. Det ble valgt både TIN og GRID, men hver for seg for å skape et sammenligningsgrunnlag. Derfor måtte dataene importeres i to omganger. Når oppsettet er klart importeres dataene inn til ArcMap. Importeringen omfatter tverrsnittene med informasjon om vannstanden for hver enkelt tverrsnittprofil, grensepolygon som avgrensner området for flomsoneanalysene, og punkter for strømningshastighet og bankpunkter. Polygonen som avgrensner flomanalyseområdet blir bestemt ut fra ytterpunktene til tverrsnittene (Ackerman, 2012).

For å kartlegge flomsoneene må det først velges hvilken *steady flow*-profil flomsoneene skal beregnes ut fra (for eksempel 100-årsflom). Programmet lager så et TIN som følger



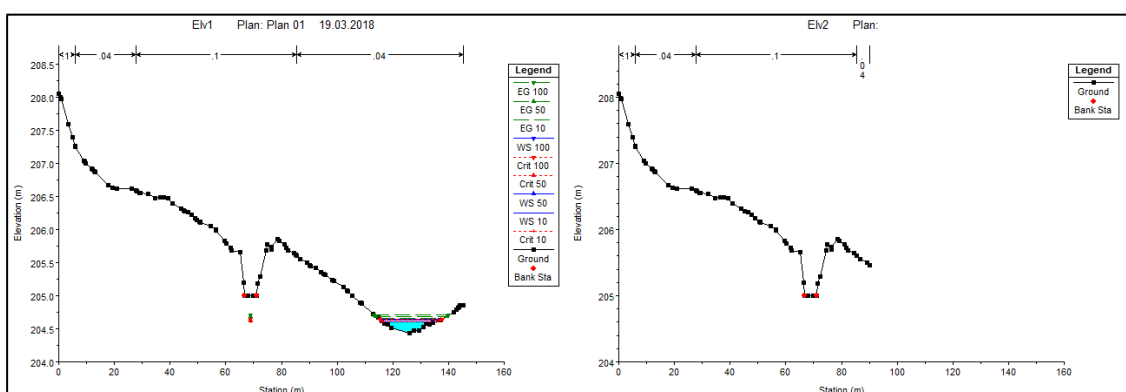
Figur 4-21: Oppsett av lag til import i HEC-GeoRAS.



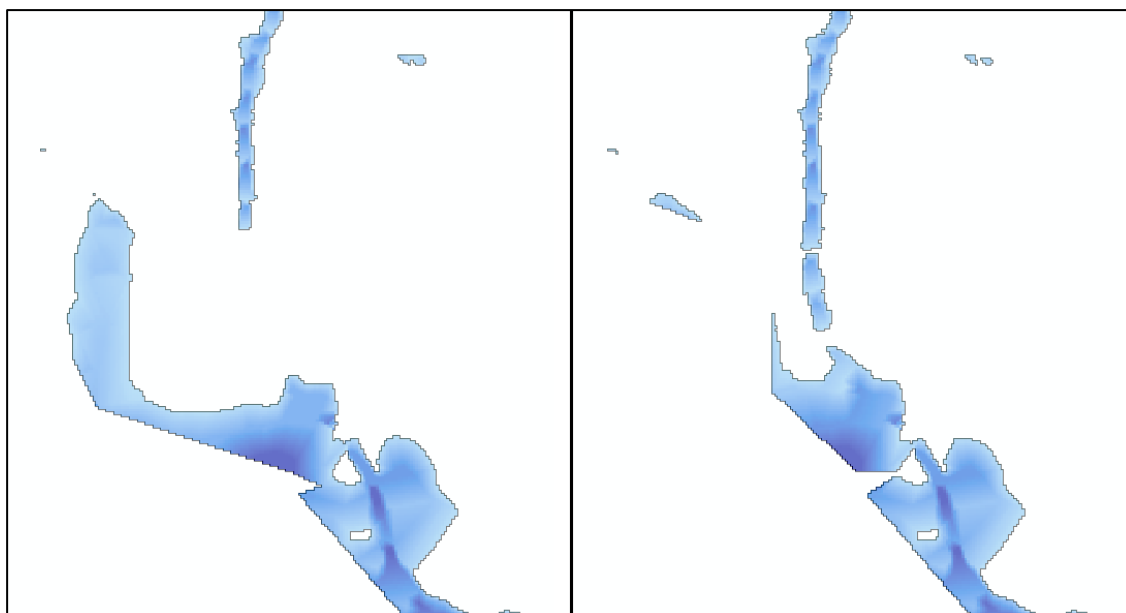
Figur 4-22: Den gule polygonen (grensepolygonen) viser begrensningen for flomsonekartleggingen. Her ser en at den følger ytterpunktene til tverrsnittene (grønne linjer). Røde punkter er bankpunkter, mens blå og svarte punkter holder informasjon om strømningshastighet.

flomanalyseområdet. Når det er gjort kjører man *floodplain delineation using rasters*, verktøyet som lager flomsonekartet. Den gjør om TIN-et til et GRID som brukes til å beregne høydeforskjellene inne i grensepolygonen. Vannhøyder høyere enn terrenghøyden vil inkluderes i et vanddybde-GRID. Polygonen som definerer flomsone er basert på dette GRID-et (Ackerman, 2012).

Da analysen var kjørt gjennom første gang oppdaget jeg at noen steder hadde vannet samlet seg opp godt utenfor elvekanalen, fordi tverrsnittene på disse stedene dekket områder som lå under nivået til elvekanalen. Tverrsnittene ble derfor kuttet for å unngå dette, og dermed «tvinge» elva inn i elvekanalen (Figur 4-23 og Figur 4-24).



Figur 4-23: Fjerning av stasjoner til høyre sett nedstrøms. Opprinnelig tverrsnitt til venstre og kuttet tverrsnitt til høyre. Laveste punkt ligger utenfor elvekanalen i tverrsnittet til venstre.



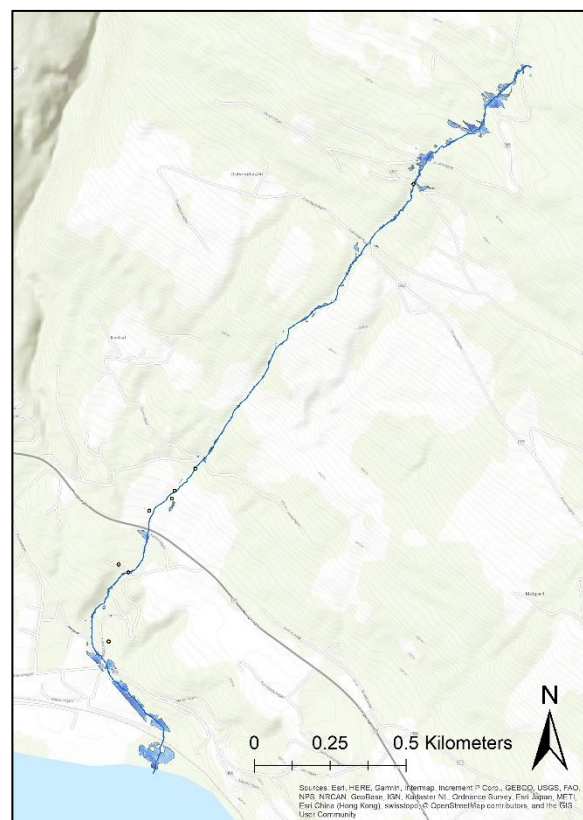
Figur 4-24: Tydelige resultater etter kutting av tverrsnitt (til høyre).

## Kapittel 5 - Resultater

Dette kapitlet vil presentere de forskjellige kartene jeg har produsert ved hjelp av HEC-RAS. Først presenteres de forskjellige bildepunktene, så leseren kan referere til dem underveis i presentasjonen av resultatene. Flommodeller med TIN-modelleringer vil presenteres først, og deretter GRID. Resultatene vil jeg sammenligne med skadedata og egne bilder fra området, for å danne et grunnlag for drøfting av nøyaktigheten til resultatene. Kart som viser de beregnede flomsonene for hele Brandrudsåa ses i Figur 5-1 og Figur 5-2 under.



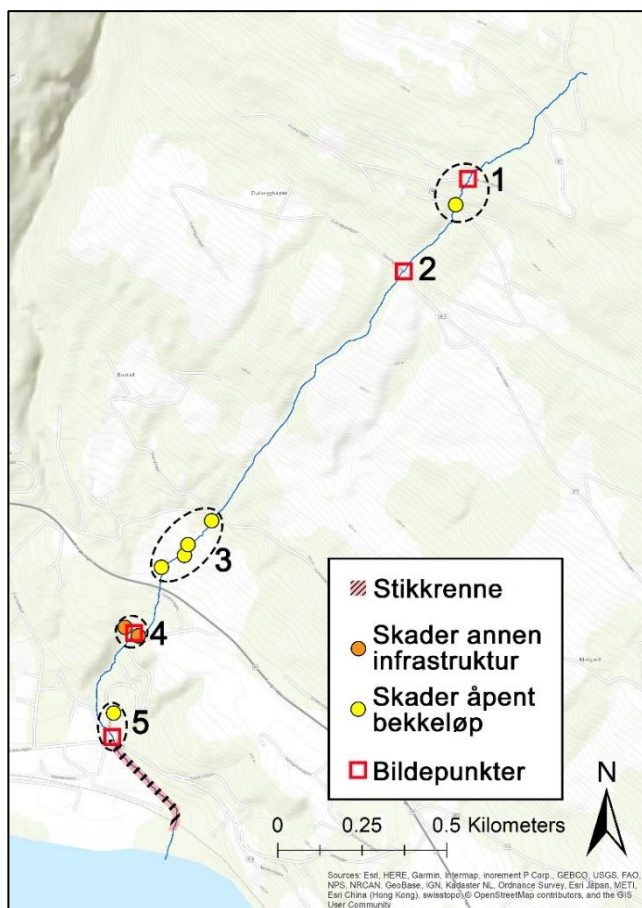
Figur 5-1: Flomsoner i Brandrudsåa ved 100-årsflom laget i HEC-RAS med TIN som terrengmodell.



Figur 5-2: Flomsoner i Brandrudsåa ved 100-årsflom laget i HEC-RAS med GRID som terrengmodell.

### 5.1 Skade- og bildepunkter

For å verifisere resultatene vil jeg sammenligne de med skadedata og bilder jeg selv tok under feltundersøkelser i juli 2017, rett etter en styrtflom. Skadedataene er hentet fra Naturskadefondet (Landbruksdirektoratet, 2018) som ved tidspunktet for registreringene var administrert av lensmannen. Digitaliseringen er gjennomført i regi av *regional plan for Gudbrandsdalslågen og sidevassdrag*, som var ledet av Oppland fylkeskommune.



Figur 5-3: Kart over skade- og bildepunkter i den digitaliserte delen av Brandrudsåa. Kartet viser også de nummererte områdene som presenteres i dette kapitlet. Den lange stikkrenna under nye E6 vises i rødt med svart skravur nederst i elveløpet.

Registreringen av dataene er utført etter flomhendelsene i 2011 og 2013, og digitaliseringen av kartet er gjennomført mellom 2015 og 2017. Opplysningene om skadedataene fikk jeg av Per Wiréhn, hydrolog og GIS-konsulent i Skred AS, i personlig e-postkorrespondanse (19. april 2018). Skadedataene fikk jeg tilsendt mens han jobbet i Bane NOR, 28. november 2017. Flomhendelsen i 2011 i Sør-Fron kommune kostet totalt 11 111 000 kroner fordelt på 98 skader. Sju av dem var skader på åpent bekkeløp med en total kostnad beregnet til 462 000 kroner, mens seks tilfeller var skade på annen infrastruktur (gjerdet, broer, støttemur og avløpsanlegg) med en beregnet kostnad på 314 170 kroner. Det er totalt åtte skadepunkter i

umiddelbar nærhet til den digitaliserte delen av Brandrudsåa. Av disse er seks punkter klassifisert som skader på åpent bekkeløp, og to punkter klassifisert som skader på annen infrastruktur (Oppland fylkeskommune, 2018).

Under feltundersøkelser i juli 2017 tok jeg bilder flere steder i Brandrudsåa. Noen steder hadde elva tydelig preget terrenget, som følge av høy vannføring. Fire av punktene har jeg valgt ut for å verifisere flommodellen. Punktene ble valgt ut fordi bildene er gode og fordi jeg har klart å stedfeste de helt sikkert, i tillegg til at de ligger i nærheten av de registrerte skadepunktene fra flommene i 2011 og 2013. Alle punktene er på steder elva går i stikkrenner under bilvei. Flommodellene som blir presentert i dette kapitlet er basert på vannføringen til 100-årsflom ( $2,8 \text{ m}^3/\text{s}$ ) og 100-årsflom med klimapåslag for hele vassdraget (ca.  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Dette fordi flommen i 2011 ifølge Vatne (2013) blir karakterisert som en 100-årsflom, hvor vannføringen noen steder til og med var over det nivået. Det vil også være interessant å se hvordan en slik flom med klimapåslag potensielt vil se ut. Alle ortofoto brukt i figurene er



hentet fra Norge i bilder og er tatt 28. juni 2017, ca. én måned før styrtflommen i juli 2017 (Norgebilder.no, 2018). Skadebeskrivelsene er hentet fra skadedataene.

## 5.2 Område 1

Område 1 er der fylkesvei 407 krysser Brandrudsåa for andre og tredje gang. Ifølge NEVINA er lengden på vassdraget frem til øverste krysning ca. 1,7 km. Øverste krysning er et bildepunkt, mens nederste er et skadepunkt.



Figur 5-4: (Bilde 1) Brandrudsåa sett oppstrøms. Bærer preg av tidligere høy vannstand (Foto: Henning Sigstad, juli 2017).



Figur 5-5: (Bilde 2) Brandrudsåa sett nedstrøms. Her har det tilsynelatende vært relativt liten vannstand (Foto: Henning Sigstad, juli 2017).

Skadepunktet ligger ved andre krysning, ca. 75 meter nedenfor bildepunktet. Skaden er fra flommen i 2013, og skadeårsaken oppgis som en kombinasjon av store nedbørsmengder og snøsmelting som førte til stor vannføring. Flommen gjorde skade og endret elveløpet i en strekning på 150 meter i svært bratt terreng. Skadene omfattet beite og ødeleggelse av et gjerde. Det oppgis at skråningen mot beitet ble plastret (rød sirkel i Figur 5-6).



Figur 5-6: Mulig spor av plastringen etter flommen i 2013 nedenfor skadepunktet (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017)

### 5.2.1 TIN

Under følger Figur 5-7 og Figur 5-8, som viser vannstand ved henholdsvis 100-årsflom og 100-årsflom med klimapåslag i område 1, med TIN som terrengmodell. I Figur 5-9 sammenlignes de to modellene.



Figur 5-7: Vannstand ved  $2,8 \text{ m}^3/\text{s}$  vannføring med TIN som terrengmodell. Røde punkter angir hvor bildene er tatt, gult punkt er skadepunktet (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).



Figur 5-8: Vannstand ved  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  vannføring med TIN som terrengmodell (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).



Figur 5-9: Sammenligning av de to TIN-modellene. Vannstand ved  $2,8 \text{ m}^3/\text{s}$  i blått lagt oppå  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  i rødt (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).

Oppstrøms, i bilde 1 (Figur 5-4) og i begge TIN-modellene, er det tegn til at det har vært høy vannføring, mens det er lite tegn til at det er tilfellet nedstrøms. Dette tyder på en viss korrekthet i flommodellen, siden den modellerer tilsynelatende korrekt nedstrøms og viser en høy vannstand oppstrøms. Likevel ser det ut til at modellene overdriver vannstanden oppstrøms. Ifølge modellen vil tunet foran huset vest for første krysningpunkt bli oversvømt, og det samme for huset oppstrøms øst for andre krysningpunkt. Jeg så ingen tegn til at dette hadde forekommet under mine feltundersøkelser, ei heller er det noen skadedata som tilsier at det har skjedd tidligere. Med tanke på økt vannføring og dermed større energi i elva, er det selvfølgelig en mulighet at elva kan oversvømme området på denne måten ved en flom med klimapåslag.

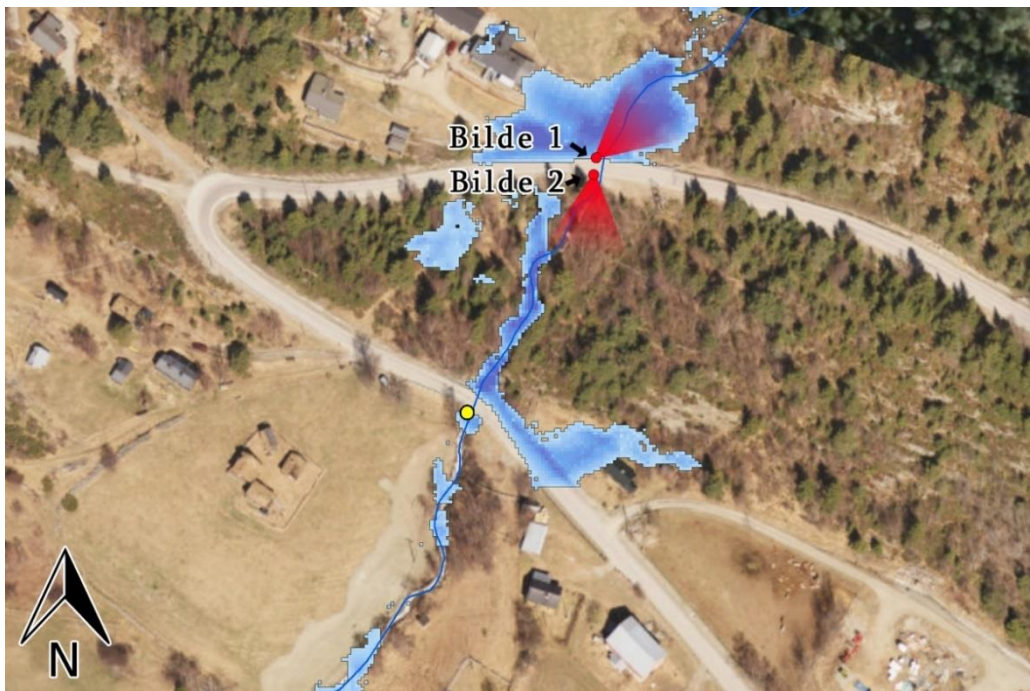
Nedstrøms for andre krysning ligger beitet som hadde blitt plastret etter flommen i 2013 som følge av høy vannføring. Her er elva modellert stor, men ikke unaturlig stor, som oppstrøms for veikrysningene. En så høy vannføring kan føre til et lite skred i det kringliggende området, og derfor virker ikke de modellerte vannføringene helt usannsynlige i den delen av elva.

### 5.2.2 GRID

Under følger Figur 5-10 og Figur 5-11, som viser vannstand ved henholdsvis 100-årsflom og 100-årsflom med klimapåslag i område 1, med GRID som terrengmodell. I Figur 5-12 sammenlignes modellene.



Figur 5-10: Vannstand ved  $2,8 \text{ m}^3/\text{s}$  vannføring med GRID som terrengmodell. Røde punkter angir hvor bildene er tatt, gult punkt er skadepunktet (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).



Figur 5-11: Vannstand ved  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  vannføring med GRID som terrengmodell (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).



Figur 5-12: Sammenligning av de to GRID-modellene. Vannstand ved  $2,8 \text{ m}^3/\text{s}$  i blått lagt oppå  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  i rødt (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).

Akkurat som i TIN-modellene er det høyere vannstand oppstrøms enn nedstrøms. Her også virker det som at vannstanden overdrives oppstrøms, både ved bilde- og skadepunktet. I tillegg er GRID-modellene tydelig mer fragmenterte sammenlignet med de basert på TIN, noe som er interessant å se spesielt sør for skadepunktet, der beitet er plastret (Figur 5-13). Det virker lite sannsynlig at en så lav vannstand kan påføre de skadene beskrevet i skadepunktet. Dette støtter oppfatningen om at raster- og Lidar-data kan underrepresentere bratte, komplekse terreng (Hengl og Evans, 2009; Nelson et al., 2009).



Figur 5-13: Detalj av område 1 nedstrøms for skadepunktet. GRID-modellen i blått lagt oppå TIN-modellen i rødt ved vannføring på  $2,8 \text{ m}^3/\text{s}$  (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).

### 5.3 Område 2

Område 2 ligger litt nedenfor det første og krysser med Dalsegvegen, en vei som går inn til noen private eiendommer innenfor. Området er kun et bildepunkt.



Figur 5-14: (Bilde 1) Brandrudsåa sett oppstrøms. Bærer tydelig preg av tidligere høy vannstand her også (Foto: Henning Sigstad, juli 2017)



Figur 5-15: (Bilde 2) Også preg av tidligere høy vannføring nedstrøms (Foto: Henning Sigstad, juli 2017).

### 5.3.1 TIN

Her vises Figur 5-16 og Figur 5-17, som illustrerer vannstand ved henholdsvis 100-årsflom og 100-årsflom med klimapåslag i område 2, med TIN som terrengmodell. I Figur 5-18 sammenlignes de to modellene.



Figur 5-16: Vannstand ved  $2,8 \text{ m}^3/\text{s}$  vannføring med TIN som terrengmodell. Røde punkter angir hvor bildene er tatt (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).



Figur 5-17: Vannstand ved  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  vannføring med TIN som terrengmodell (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).





Figur 5-18: Sammenligning av de to TIN-modellene. Vannstand ved 2,8 m<sup>3</sup>/s i blått lagt oppå 6 m<sup>3</sup>/s i rødt (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).

Her virker flommodellene å være nokså konservative og mer nøyaktige i sine prediksjoner. Rett oppstrøms for veien dekker modellen ved 2,8 m<sup>3</sup>/s vannføring et område som kan virke sannsynlig ut fra bilde 1 (Figur 5-14), om enn noe overdrevet. Nedstrøms dekker modellen et areal som ligner området med mye usortert materiale i bilde 2 (Figur 5-15). Om den store flomsonen som ligger mellom gårdstunet og brua er riktig, vet jeg ikke. Flomsonen ligger på et privat område, så jeg hadde ikke anledning til å ta bilder. Ved en vannføring på 6 kontra 2,8 m<sup>3</sup>/s er det ikke så stor forskjell i prediksjonene annet enn en vesentlig større sone rett oppstrøms for veien. Det er også verdt å merke seg avviket som oppstår på nordsiden av gårdstunet under beregningen av en så stor vannføring. Grunnen er antakeligvis et tverrsnitt som dekker et litt for stort område, som var et problem flere steder de første gangene flomanalysene ble kjørt. Dette er også forklart i delkapittel 4.4.3 om flomsonekartlegging.

### 5.3.2 GRID

I Figur 5-19 og Figur 5-20 vises vannstand ved henholdsvis 100-årsflom og 100-årsflom med klimapåslag i område 2, med GRID som terrengmodell. I Figur 5-21 sammenlignes modellene.



Figur 5-19: Vannstand ved 2,8 m<sup>3</sup>/s vannføring med GRID som terrengmodell. Røde punkter angir hvor bildene er tatt (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).



Figur 5-20: Vannstand ved 6 m<sup>3</sup>/s vannføring med GRID som terrengmodell (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).



Figur 5-21: Sammenligning av de to GRID-modellene. Vannstand ved 2,8 m<sup>3</sup>/s i blått lagt oppå 6 m<sup>3</sup>/s i rødt (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).

Akkurat som i område 1 er det betydelig lavere vannstand i GRID-modellene enn i TIN-modellene. Det er tydelig mindre vann opp- og nedstrøms for veien sammenlignet med TIN-modellene, og det virker for å være en viss underrepresentasjon her sammenlignet med bilde 1 og 2. Det er også verdt å merke seg at begge GRID-modellene har avviket nord for gårdstunet på vestsiden av elva.



Figur 5-22: Sammenligning av modellene ved vannføring på 2,8 m<sup>3</sup>/s. GRID-modellen i blått lagt oppå TIN-modellen i rødt (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).

## 5.4 Område 3



Figur 5-23: Område 3 med nummerering av skadepunkter. Kongsvegen (gamle E6) nede til venstre (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).

Område 3 består av fire skadepunkter samlet innenfor et ganske lite område. På det øverste skadepunktet renner elva gjennom et gårdstun. De tre resterende er på et jordbruksområde. Alle registreringene er fra flommen i 2013. Ved øverste skadepunkt (1) står det i registreringene at 150 meter har blitt vasket bort og nedauret. Her vil jeg anta at det menes 150 meter nedstrøms. Traktorveien som ligger like ved har også blitt vasket bort, noe som trolig



Figur 5-24: Mulig spor etter utvasking nedenfor øverste skadepunkt (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).

skyldes at elva har gått utover sine bredder og over på veien. Ovenfor skadepunktet, hvor elva går i rør, er det en brønn som har blitt fylt igjen med slam og elva har avsatt grove masser i elveløpet. Ved skadepunkt 2 hadde elva gravd ut store mengder masse og det tilhørende jordet, hvor massen hadde spredt seg videre utover et stort område. Det berørte området gikk fra skadepunkt 2 til 4. Ved skadepunkt 3 har vann på avveie erodert bort fire dekar av jordet, helt ned til Kongsvegen. 200 m<sup>3</sup> masse og 80 m<sup>3</sup> matjord ble vasket bort. Traktorveien som ligger i overgangen mellom skogen og jordet ble også vasket bort. Mot Kongsvegen ble et gjerde på 100 meter ødelagt, trolig på grunn av at vannet fant en ny vei fra skadepunkt 2 som følge av avsetning av mye masser. Ved nederste skadepunkt (4) hadde elva transportert masse tilsvarende 4 000 m<sup>3</sup>. Ei stikkrenne og et 70 meter langt gjerde ble ødelagt. Det berørte området strakk seg fra skadepunktet til Kongsvegen, et område på åtte dekar ifølge grunneier. Årsaken oppgis som en kombinasjon av høy vannføring og vann på avveie.

#### 5.4.1 TIN

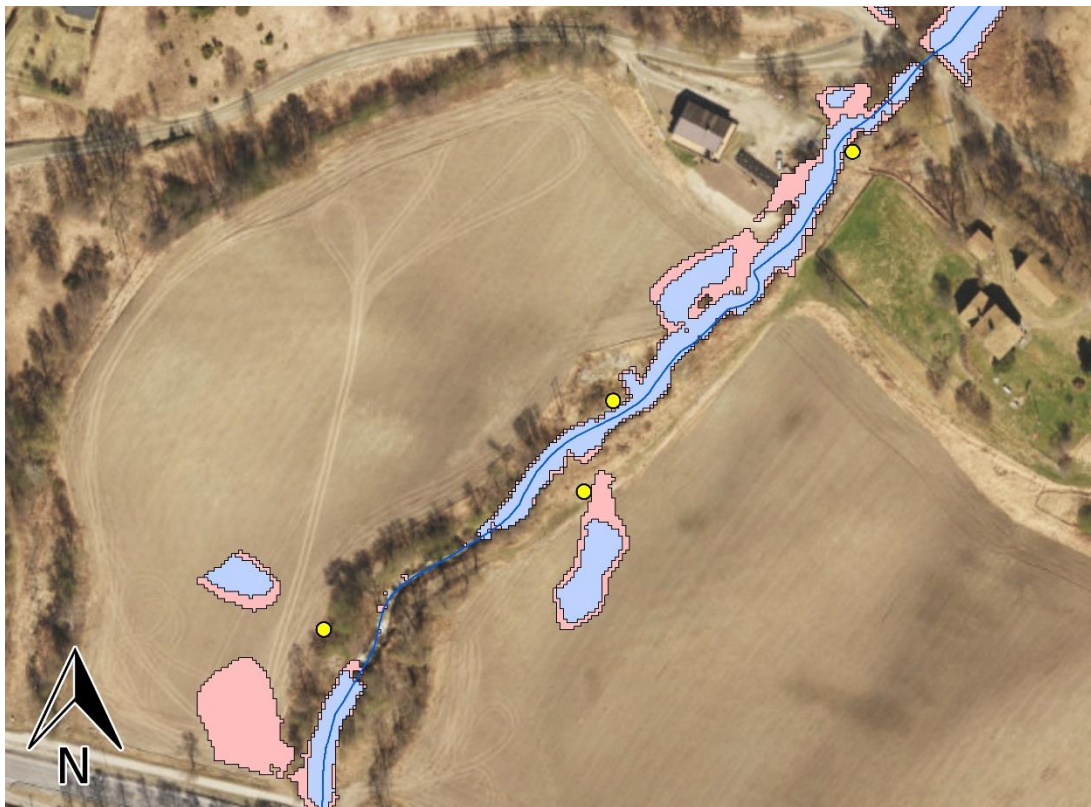
I Figur 5-25 og Figur 5-26 vises TIN-modeller med vannstand ved henholdsvis 100-årsflom og 100-årsflom med klimapåslag i område 3. En sammenligning av dem ses i Figur 5-27.



Figur 5-25: Vannstand ved 2,8 m<sup>3</sup>/s vannføring med TIN som terrengmodell. Gule punkter er skadepunkter (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).



Figur 5-26: Vannstand ved  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  vannføring med TIN som terrengmodell (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).

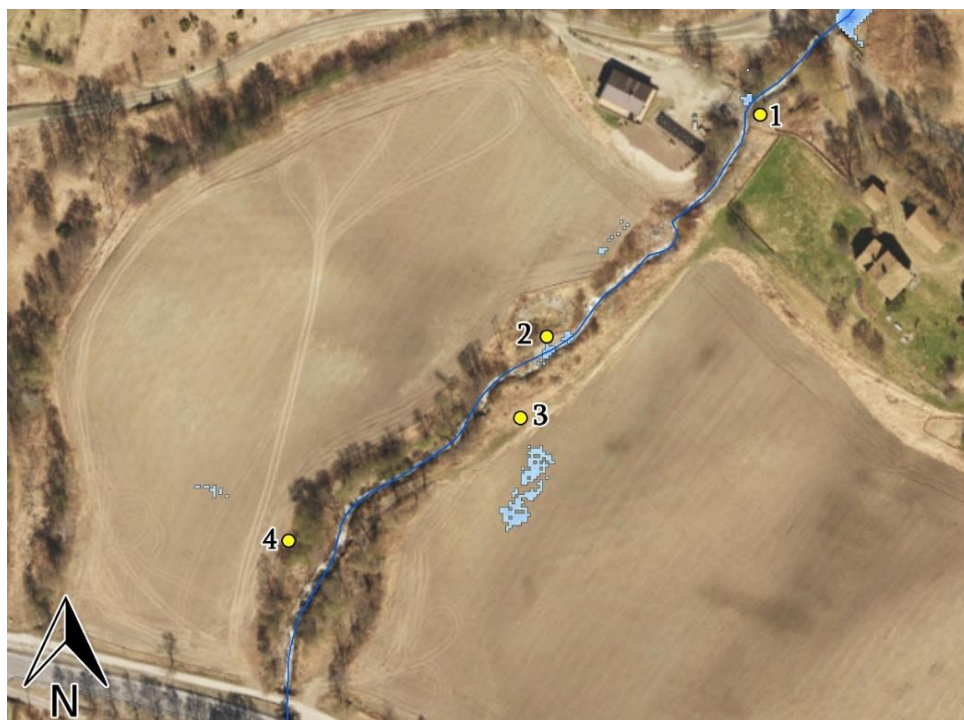


Figur 5-27: Sammenligning av de to TIN-modellene. Vannstand ved  $2,8 \text{ m}^3/\text{s}$  i blått lagt oppå  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  i rødt (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).

Nedenfor skadepunkt 1 er det såpass høy vannføring i modellene at utvasking og nedauring av jorde og traktorvei kan virke sannsynlig. Tendensen ser ut til å være at vannet vil gå over sine bredder over til jordet i vest, noe som kan stemme med beskrivelsene av skadene i rapporten for både skadepunkt 1 og 2. Ovenfor stikkrenna i veien helt øverst i området blir elva demt opp. Dette kan forårsake avsetningen av grovmasse som beskrevet. Ved skadepunkt 2 er det beskrevet at jordet er påvirket helt til skadepunkt 4. Ifølge modellen vil det ikke flomme over med så mye vann mellom de to punktene, men skadene kan være etter masseavsetning, fremfor en ren oversvømmelse. Rapporten spesifiserer ikke dette ordentlig. Ved skadepunkt 4 ble ifølge rapporten jordet erodert, og stikkrenne og gjerde ødelagt fra skadepunktet til Kongsvegen. Denne beskrivelsen kan samstemme med de flomsonene digitalisert i modellene, der modellen viser at jordet mot vest vil oppleve betydelige mengder vann på avveie, spesielt ved en vannføring på  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ . Sør for skadepunkt 3 ser en i modellen oversvømmelser på det østlige jordet, noe som kan virke sannsynlig med tanke på beskrivelsen om at vann på avveie eroderte bort deler av jordet helt ned til Kongsvegen.

#### 5.4.2 GRID

I Figur 5-28 og Figur 5-29 vises vannstand ved henholdsvis 100-årsflom og 100-årsflom med klimapåslag i område 3, med GRID som terrengmodell.



Figur 5-28: Vannstand ved  $2,8 \text{ m}^3/\text{s}$  vannføring med GRID som terrengmodell. Gule punkter er skadepunkter (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).



Figur 5-29: Vannstand ved 6 m<sup>3</sup>/s vannføring med GRID som terrengmodell (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).

Ingen særlige forskjeller på GRID-modellene i dette området. Igjen er de mye mer fragmentert og har en mye lavere vannstand enn TIN-modellene (Figur 5-30). En så lav vannstand virker svært lite sannsynlig med tanke på de beskrivelsene som er gjort av skadene i området.



Figur 5-30: Sammenligning av modellene ved vannføring på 2,8 m<sup>3</sup>/s. GRID-modellen i blått lagt oppå TIN-modellen i rødt (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).



## 5.5 Område 4

Område 4 ligger like ovenfor der Brandrudsåa og sideelva Trilla møtes, og rett før det siste bratte partiet ned til dalbunnen. Ifølge NEVINA ligger punktet ca. 3,4 km ned i vassdraget, altså ytterligere 1,7 km nedenfor område 1. Dette betyr at elva har akkumulert betydelig mer vann. Her er det i tillegg en vei som går over begge elvene. Trilla har ikke blitt digitalisert, men jeg har likevel med et bilde derfra som en illustrasjon på hva som kan skje når stikkrenner fylles opp og vannet tar nye veier.



Figur 5-31: (Bilde 1) Brandrudsåa sett oppstrøms. Tydelig synlig bevis på tidligere høy vannføring. Flomveien fra Trilla i Figur 5-32 kommer inn nederst i bildet (Foto: Henning Sigstad, juli 2017).



Figur 5-32: (Bilde 2) Flomvei dannet av vann som har rent over fra Trilla til Brandrudsåa. Gropen som vises i Figur 5-34 er øverst til venstre i bildet (Foto: Henning Sigstad, juli 2017).



Figur 5-33: (Bilde 3) Brandrudsåa nedstrøms. Noen spor av høy vannføring (Foto: Henning Sigstad, juli 2017).

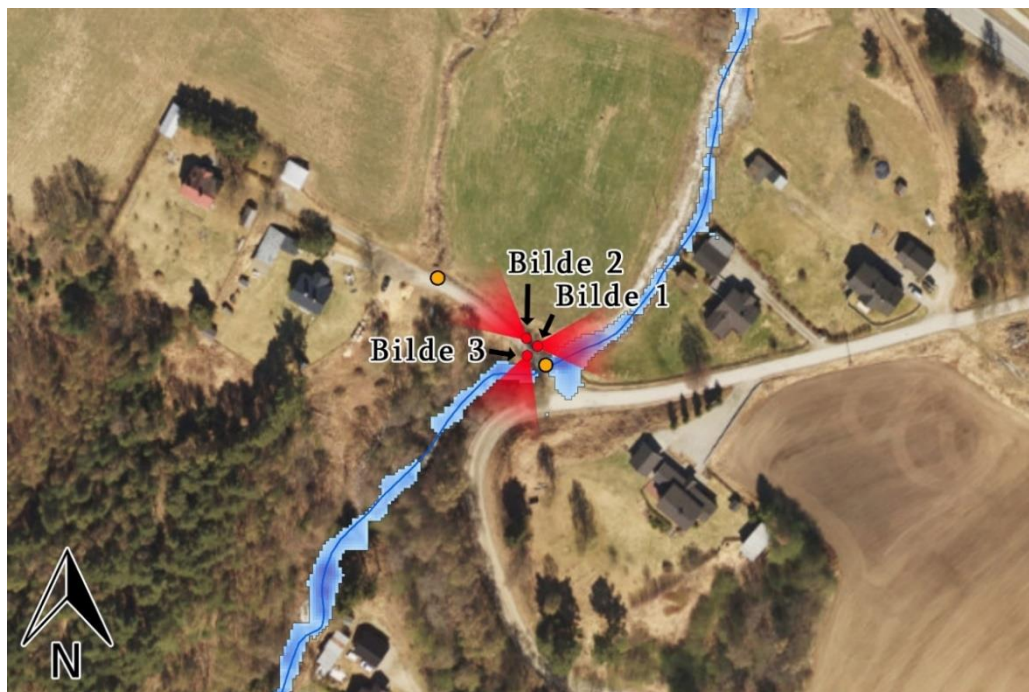


Figur 5-34: Utgravinger gjort av Trilla rundt ei stikkrenne under en styrftom (Foto: Petter Aasen, juli 2017).

Det er to skadepunkter i området, et i øst og et i vest. Begge er skade på infrastruktur og er derfor markert med oransje i kartene. Det vestlige punktet er skade på stikkrenne i sideelva Trilla og er derfor ikke analysert, men ut fra beskrivelsene av skadene ser det ut til å ligne det som skjedde under flommen i 2017 (Figur 5-34). Det østlige punktet er en bro over Brandrudsåa som fikk skader på vanger opp- og nedstrøms på grunn av store vannmengder.

### 5.5.1 TIN

Under følger Figur 5-35 og Figur 5-36, som viser vannstand ved henholdsvis 100-årsflom og 100-årsflom med klimapåslag i område 4, med TIN som terrengmodell. I Figur 5-37 sammenlignes de to modellene.



Figur 5-35: Vannstand ved  $2,8 \text{ m}^3/\text{s}$  vannføring med TIN som terrengmodell. Røde punkter angir hvor bildene er tatt, oransje punkter er skadepunkter (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).



Figur 5-36: Vannstand ved  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  vannføring med TIN som terrengmodell (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).



Figur 5-37: Sammenligning av de to TIN-modellene. Vannstand ved 2,8 m<sup>3</sup>/s i blått lagt oppå 6 m<sup>3</sup>/s i rødt (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).

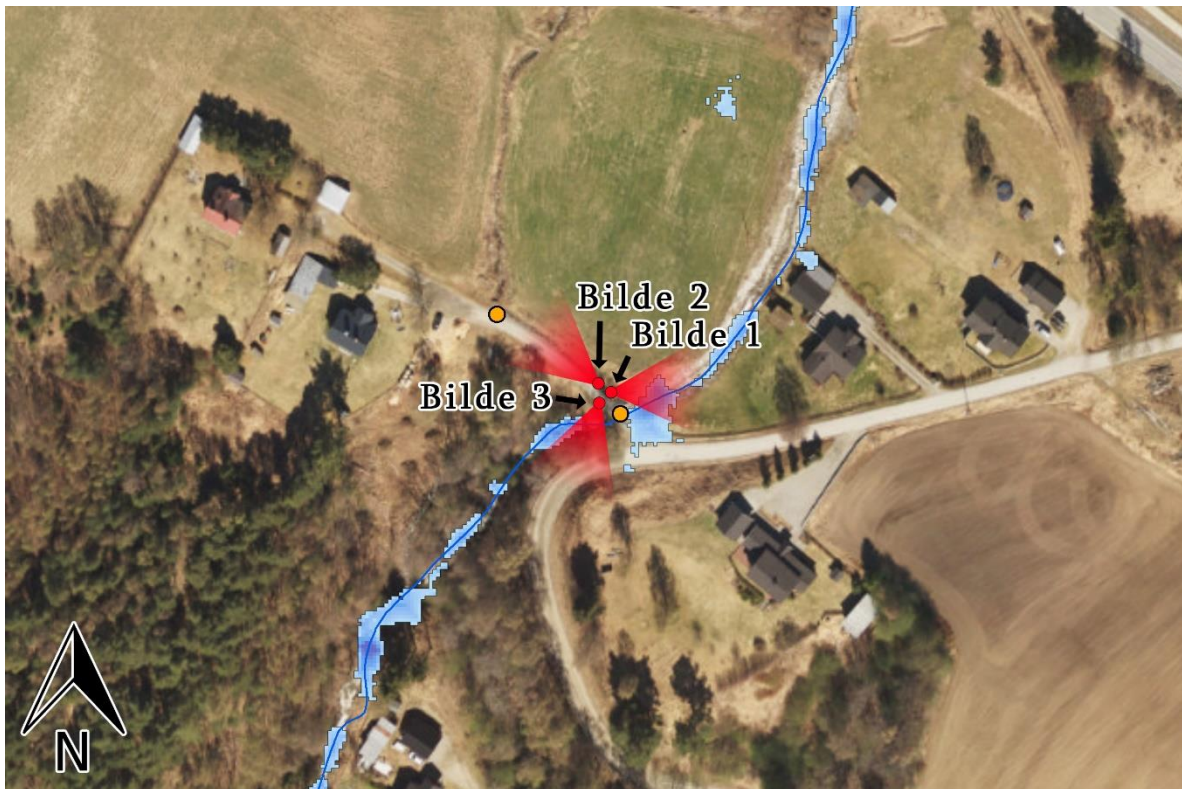
Oppstrøms for der Brandrudsåa og veien krysser er det veldig høy vannstand. Dette kan stemme overens med skadebeskrivelsene om at brua på det østlige skadepunktet led store skader under flommen. Vannstanden nedstrøms virker ganske sannsynlig når man sammenligner med Figur 5-33. Det er interessant å se vannstanden ved en vannføring på 6 m<sup>3</sup>/s der brua ligger, der det ser ut til at brua vil oppleve store skader om modellen er korrekt.

### 5.5.2 GRID

Figur 5-38 og Figur 5-39 viser vannstand ved henholdsvis 100-årsflom og 100-årsflom med klimapåslag i område 3, hvor GRID er terrengmodell. I Figur 5-40 sammenlignes modellene.



Figur 5-38: Vannstand ved 2,8 m<sup>3</sup>/s vannføring med GRID som terrengmodell. Røde punkter angir hvor bildene er tatt, oransje punkter er skadepunkter (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).



Figur 5-39: Vannstand ved 6 m<sup>3</sup>/s vannføring med GRID som terrengmodell (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).



Figur 5-40: Sammenligning av de to GRID-modellene. Vannstand ved 2,8 m<sup>3</sup>/s i blått lagt oppå 6 m<sup>3</sup>/s i rødt (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).

Her er GRID-modellene nærmere TIN-modellene når det kommer til vannstand, men de er igjen mer fragmenterte. De resultatene som vises i GRID-modellene virker ikke like usannsynlige som tidligere, og kan gi en god pekepinn på de stedene som rammes hardest av en styrtflom. GRID-modellen ved  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  vannføring ligger ganske nære TIN-modellen ved  $2,8 \text{ m}^3/\text{s}$  når det kommer til vannstand.

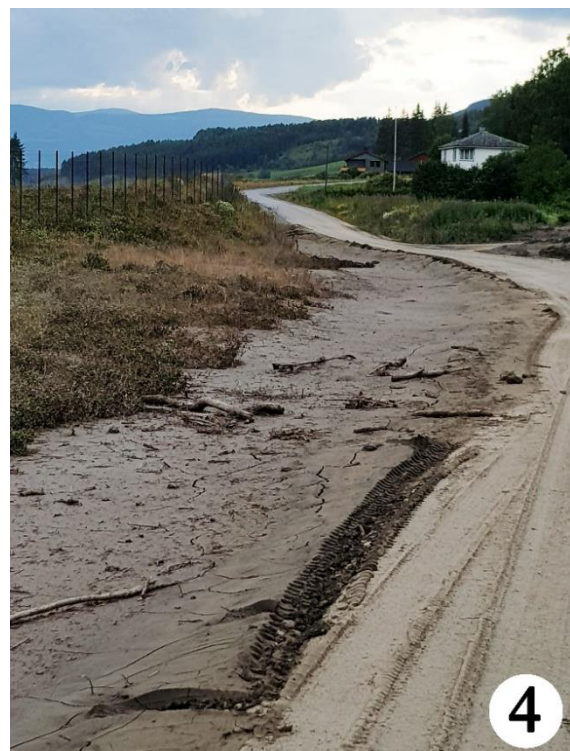


Figur 5-41: Sammenligning av modellene ved vannføring på  $2,8 \text{ m}^3/\text{s}$ . GRID-modellen i blått lagt oppå TIN-modellen i rødt (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).

## 5.6 Område 5

Område 5 ligger helt nederst i vassdraget og er på et relativt flatt område. Dette stedet er like ovenfor der nye E6 er lagt. Her renner Brandrudsåa inn i rør lagt under E6 og jernbanen. Inngangen til denne stikkrenna er stedet hvor vannføringen er beregnet i NEVINA, som betyr at flomverdiene fra dette punktet er det som er brukt i analysen. Dette ble gjort siden Brandrudsåa nesten ikke er oppe i dagen forbi dette punktet og derfor vil ikke akkumulasjonen av vann være så stor. Skadebeskrivelsen for punktet i området beskrives som at hele jordet er nedaura med til dels svært grov stein, som trolig skyldes bekken Anneåa like ved. Det står at det berørte området er fra skadepunktet til Kongsvegen. Kongsvegen ligger nord for skadepunktet, flere høydemeter over. Det er derfor mulig at akkurat denne

informasjonen enten er feil og at de mener Ysterivegen eller Eksisvegen, eller så ligger skadepunktet på feil sted.



Figur 5-42: (1) Bilde tatt nedstrøms fra brua vist i bilde 3. Inngangen til stikkrenna med doble løp under nye E6 vises. Gitteret som skal hindre større sedimenter er tydelig skadet etter flommen. Eksisvegen ses på baksiden av inngangen. (2) Bilde tatt oppstrøms fra brua i bilde 3. Lite tegn til flomskader. (3) Bilde av brua i Ysterivegen. (4) Tydelige tegn på at elva har oversvømt området rundt Eksisvegen nedstrøms for inngangen til stikkrenna under nye E6. Alle foto av Henning Sigstad, juli 2017.





Figur 5-43: (Bilde 5) Bilde tatt under flommen i 2017 av området (Foto: Einar Almehagen, juli 2017).



Figur 5-44: Beliggenheten til Eksisvegen og Ysterivegen i området (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).

### 5.6.1 TIN

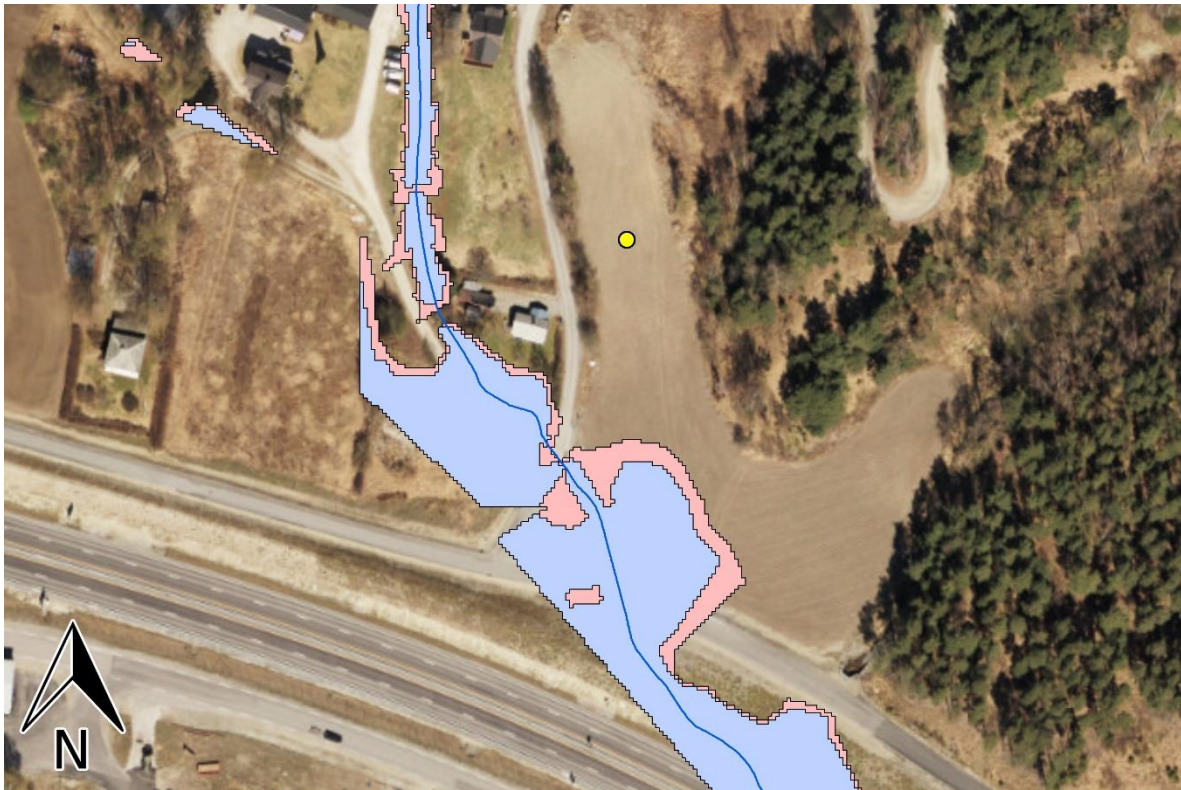
I Figur 5-45 og Figur 5-46 vises vannstand ved henholdsvis 100-årsflom og 100-årsflom med klimapåslag i område 5, med TIN som terrengmodell. I Figur 5-47 sammenlignes modellene.



Figur 5-45: Vannstand ved  $2,8 \text{ m}^3/\text{s}$  vannføring med TIN som terrengmodell. Røde punkter angir hvor bildene er tatt, oransje punkt er antatt plassering av bilde 5, gult punkt er skadepunktet (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).



Figur 5-46: Vannstand ved  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  vannføring med TIN som terrengmodell (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).

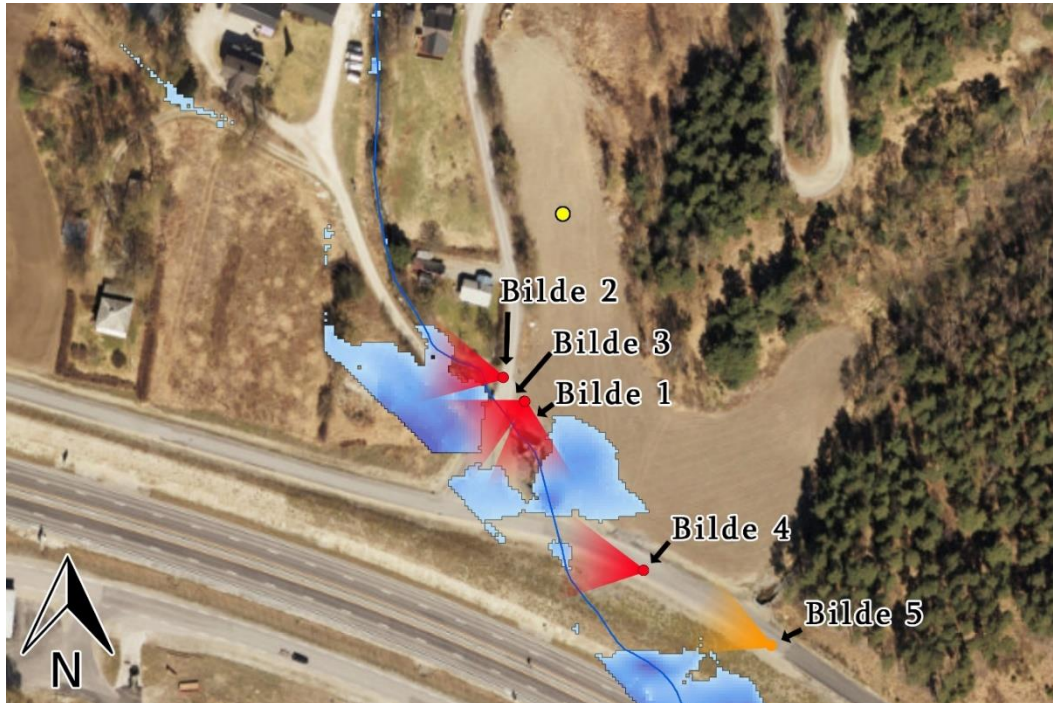


Figur 5-47: Sammenligning av de to TIN-modellene. Vannstand ved 2,8 m<sup>3</sup>/s i blått lagt oppå 6 m<sup>3</sup>/s i rødt (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).

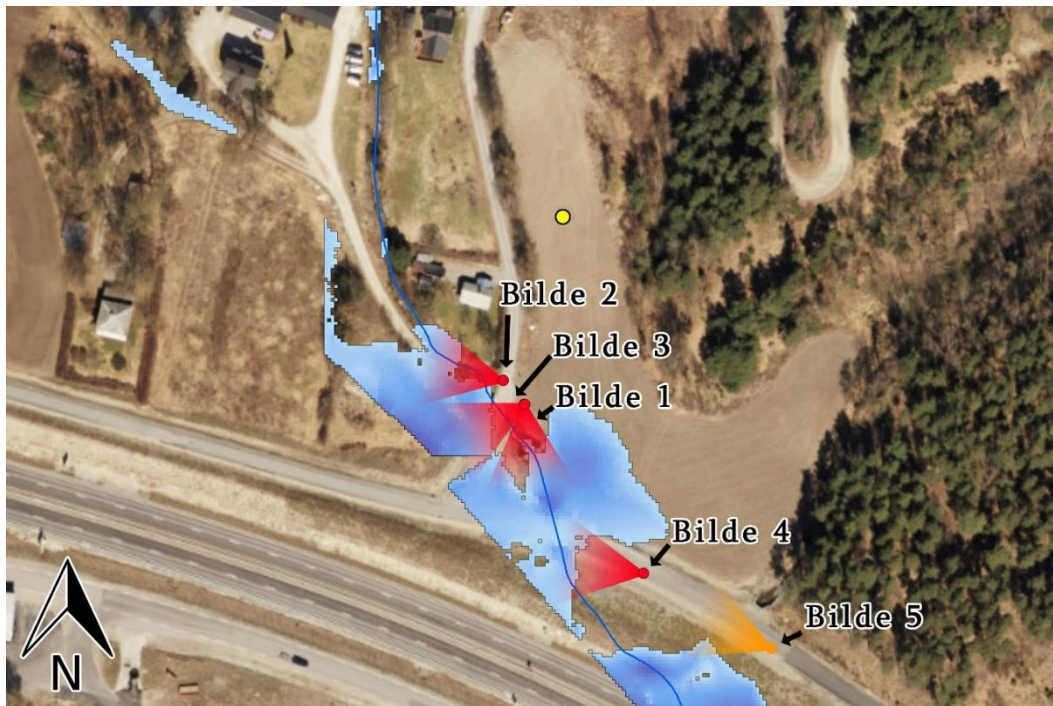
Ut fra bilde 5 (Figur 5-43) kan det se ut som at modellen faktisk underdriver vannstanden i forhold til virkeligheten. Dette kan være fordi det kommer inn en sideelv rett ovenfor der dette bildet antakeligvis er tatt, og at vannet fra denne elva er med på å oversvømme området. Det kan også være fordi forandringene i terrenget, etter at nye E6 ble bygget, ikke er med i terrenngmodellen. Ut fra bilde 2 ser det ut til at det er en liten overdrivelse av vannstanden oppstrøms for brua, hvor det ikke er spor av like høy vannføring som det som har blitt modellert. Grunnen til at vannet går over nye E6 er at terrenngmodellen er bygget på laserpunkter hentet fra 2012 og 2013, og den nye E6-en er bygget etter dette. Det er i tillegg en brå ende på flomsonene vest for stikkrenna. Dette er fordi tverrsnittene blant annet angir området som skal modelleres i HEC-RAS. Siden tverrsnittene ikke er lengere, stopper dermed analyseområdet også der. Problemstillingen er også forklart i delkapittel 4.4.3 om flomsonekartlegging. Ellers ser det ut til at vannstanden som blir modellert her virker veldig sannsynlig: det er tydelige spor etter oversvømmelser over hele området, og bilde 5 viser også at omtrent hele området ble oversvømt.

### 5.6.2 GRID

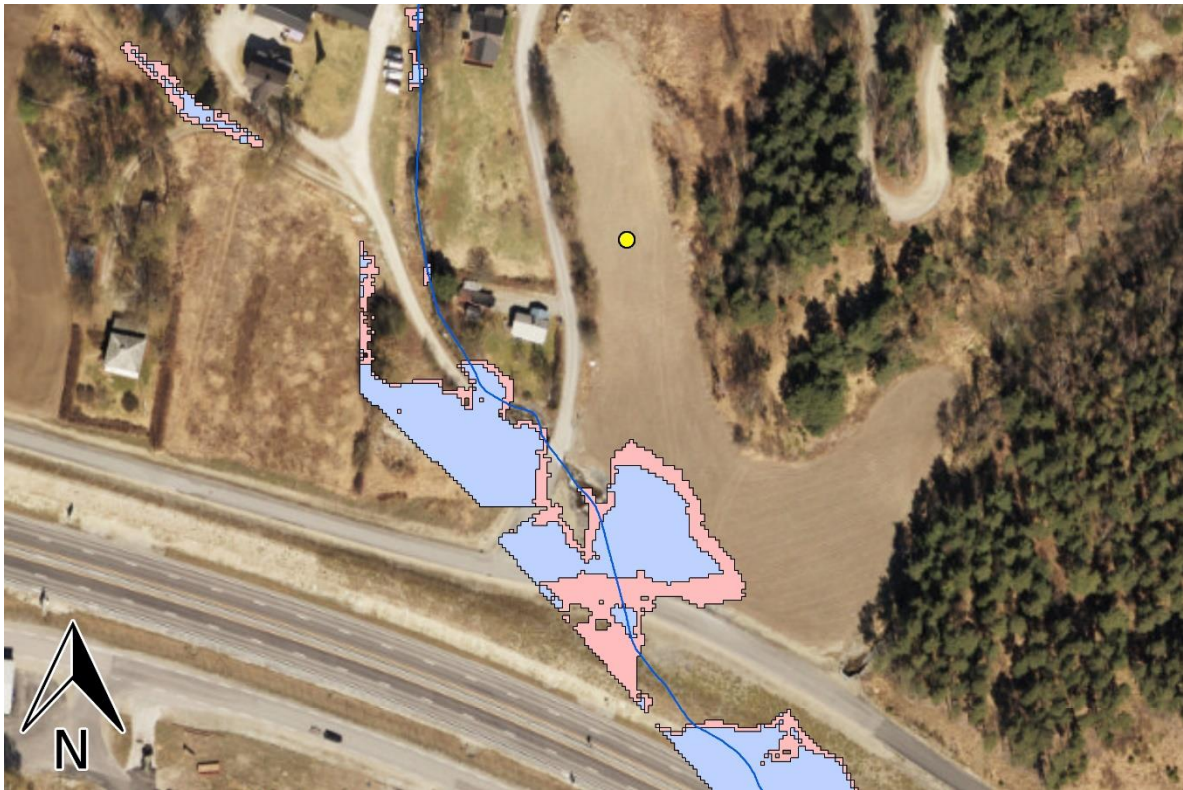
Figur 5-48 og Figur 5-49 viser vannstand ved henholdsvis 100-årsflom og 100-årsflom med klimapåslag i område 5, hvor GRID er terrengmodell. I Figur 5-50 sammenlignes modellene.



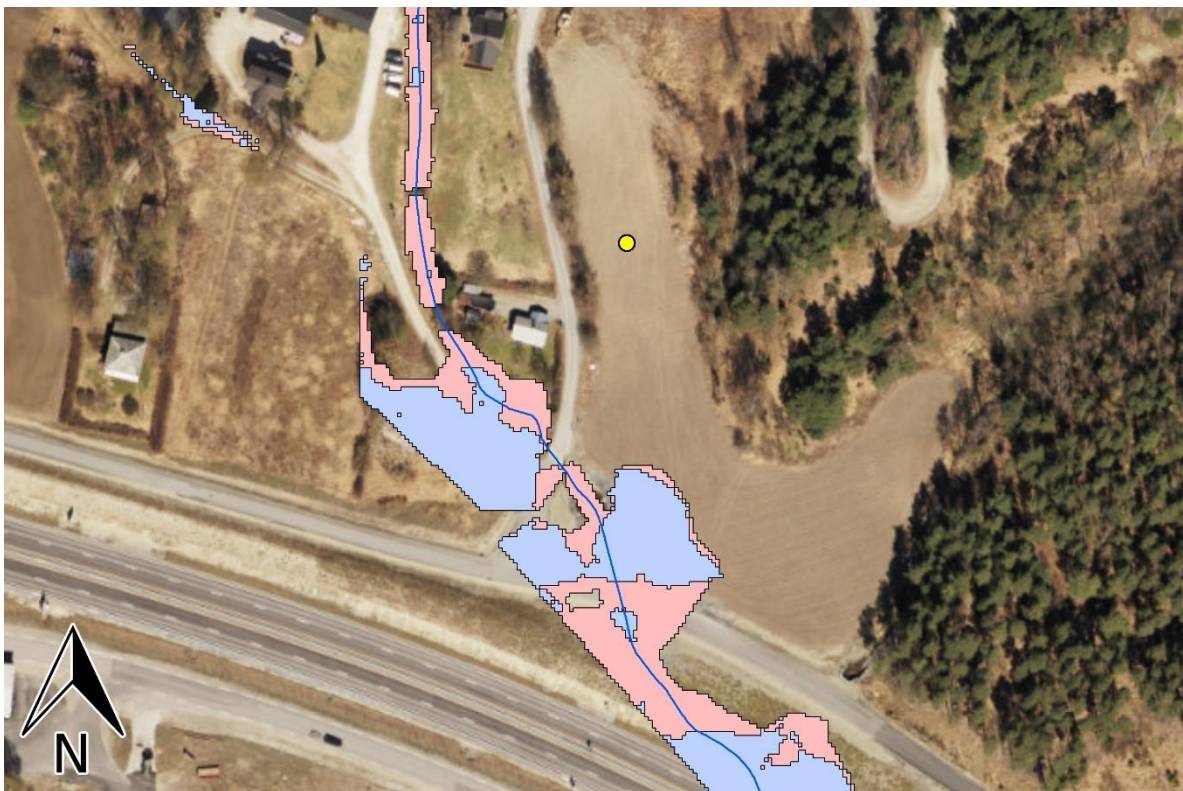
Figur 5-48: Vannstand ved  $2,8 \text{ m}^3/\text{s}$  vannføring med GRID som terrengmodell. Røde punkter angir hvor bildene er tatt, oransje punkt er antatt plassering av bilde 5, gult punkt er skadepunktet (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).



Figur 5-49: Vannstand ved  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  vannføring med GRID som terrengmodell (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).



Figur 5-50: Sammenligning av de to GRID-modellene. Vannstand ved 2,8 m<sup>3</sup>/s i blått lagt oppå 6 m<sup>3</sup>/s i rødt (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).



Figur 5-51: Sammenligning av modellene ved vannføring på 2,8 m<sup>3</sup>/s. GRID-modellen i blått lagt oppå TIN-modellen i rødt (Ortofoto: Norgebilder.no, juni 2017).

Som med de andre områdene er det modellert vesentlig lavere vannstand med GRID enn med TIN (Figur 5-51). Det er likevel mindre forskjeller her. GRID ligger nærmere virkeligheten enn det har gjort på de andre områdene. Dette er nok fordi området er ganske flatt. I delkapittel 3.4.1 blir det nevnt at TIN kan være misvisende på flate områder, så utbredelsen av vann kan derfor være en overdrivelse i TIN-modellene, og en underdrivelse i GRID-modellene.

## Kapittel 6 - Diskusjon

Flommodellene som er produsert virker å være relativt nøyaktige noen steder, spesielt hvis en ser på TIN-modellene for område 3, 4 og 5. Andre steder virker modellene å overdrive eller underdrive sterkt. Oppstrøms i område 1 og nedstrøms i område 2 ser det ut til å være en overdrivelse, spesielt i TIN-modellene. GRID-modellene generelt virker fragmenterte og noe underdrevne, noe som er spesielt synlig i område 3. En kort vurdering av modellene for de forskjellige områdene ses i Tabell 6-1.

Tabell 6-1: Kort vurdering av TIN- og GRID-modellene for hvert område.

Område	TIN	GRID
1	Ser ut til å overdrive vannstanden oppstrøms for både bilde- og skadepunktet. Vannstanden nedstrøms for begge punktene virker mer sannsynlig.	Overdriver vannstanden oppstrøms for bilde- og skadepunktet. Vannstanden nedstrøms for skadepunktet virker å være underdrevet med tanke på beskrivelsene av skadene i området.
2	Noe overdrevet oppstrøms. Potensiell feil nedstrøms sør for gårdstunet.	Mer fragmentert enn TIN. Ikke usannsynlig vannstand rett oppstrøms for stikkrenna. Har en feil nord for gårdstunet.
3	Ut fra skadebeskrivelsene ser vannstanden ut til å være sannsynlig.	Vannstanden virker underdrevet, da beskrivelsene tilsier en høyere vannstand enn den som er modellert.
4	Ut fra skadebeskrivelsene og bildene ser vannstanden ut til å være sannsynlig.	Ligner TIN-modellene, men er mer fragmentert. Virker for å være ganske sannsynlige.
5	Ut fra bildene ser vannstanden ut til å være sannsynlig. Virker for å være litt underdrevet, men det kan være på grunn av mangler i de geometriske dataene.	Ut fra bildene ser vannstanden ut til å være sannsynlig. Virker for å være litt underdrevet, men det kan være på grunn av mangler i de geometriske dataene.

Flommodellering er analyser hvor data med varierende usikkerhet benyttes, som igjen fører til en usikkerhet knyttet til resultatene. Som Rød et al. (2013) skriver vil nøyaktigheten i de beregnede flomsonene avhenge av usikkerheten i hydrologiske data, flomberegninger, vannlinjeberegninger og terrengmodellen. Det vil i tillegg knyttes enda større usikkerhet til flommer med langt gjentakelsesintervall, slik som 100-årsflommer som presenteres i denne oppgaven. Jeg antar dermed at usikkerheten rundt flommer med klimapåslag vil være enda høyere siden de tallene er basert på klimamodeller fremfor historiske data.

I en HEC-RAS-analyse introduseres enda en ny variabel: kvaliteten på data digitalisert av brukeren. Under mitt arbeid har jeg støtt på flere problemer under digitaliseringsprosessen, noe som igjen har ført til noen snarveier. Snarveiene ble tatt med hensyn til tid, for å sikre at oppgaven skulle bli ferdig. Dette kunne vært unngått hvis jeg hadde vært mer kjent med programvaren fra starten av. Litteratur om hvordan HEC-RAS fungerer har vært vanskelig å oppdrive. På grunn av det er storparten av mitt arbeid basert på brukermanualene skrevet av de som har utviklet programvaren. For HEC-RAS alene er det skrevet fem forskjellige manualer som dekker forskjellige problemstillinger (Hydrologic Engineering Center, 2018). I tillegg er det en egen manual for bruk av HEC-GeoRAS-utvidelsen i ArcMap. Manualene er ganske lange – opptil 960 sider – noe som betyr at det er mye litteratur å lese gjennom. Konsekvensen er at underveis i arbeidet har det blitt tatt en del valg basert på det som tilsynelatende virker mest riktig, eller rett og slett fordi det er det som er foreslått i én eller flere manualer. Dette er gjort med hensyn til tid, siden det er krevende å oppnå en fullstendig forståelse av alle valg og problemstillinger man må oppklare underveis i arbeidet med HEC-programvarene. Manualene jeg har brukt i arbeidet med flommodellene er (1) *GIS tools for support of HEC-RAS using ArcGIS* av Ackerman (2012), (2) *Hydraulic reference manual* av Brunner (2016), og (3) *Applications guide* av Brunner et al. (2016). Første manual ble først og fremst brukt som en rettleider for arbeidsflyten og digitaliseringen av de forskjellige lagene produsert gjennom HEC-GeoRAS. Andre manual er brukt som hovedkilden til forklaring av teorier og modelleringer som gjøres i HEC-RAS, samt verdier for energitapskoeffisienter. Tredje manual har jeg brukt som veiledning til modellering av stikkrenner.

I løpet av arbeidet med denne oppgaven har problemstillinger og metoder forandret seg underveis. I starten var jeg kun sikker på at jeg ville jobbe med noe som omhandlet flommodellering og overvann, og potensielt validere modellene gjennom sammenligning med skadedata. Etter hvert formet oppgaven seg til å fokusere på hvor vannet går når stikkrenner tetter seg. På dette stadiet ble TauDEM brukt som metode. TauDEM er et tillegg til ArcMap som lager terrengmodeller beregnet på hydrologisk modellering, hvor strømningsretningen kan potensielt deles inn i uendelige retninger (*D-infinity*) (Utah State University, 2015). Underveis i dette arbeidet fikk jeg høre om HEC-RAS. Først antok jeg det kun var for modellering av flomsoner, slik at det kunne brukes i samsvar med TauDEM. Etter å ha møtt på flere problemer i TauDEM som ikke lot seg løse ble det besluttet å fokusere på HEC-RAS. Etter å ha jobbet med HEC-RAS i godt og vel 3 til 4 måneder ble det til slutt spisset en



problemstilling, der det også ble bestemt å bruke bildene tatt under egne feltundersøkelser i juli 2017 for sammenligning, i tillegg til skadedata.

På grunn av alt dette er det helt sikkert noen valg som kunne vært gjort annerledes for å oppnå bedre resultater. Derfor vil jeg i dette kapitlet drøfte mine resultater, og de variablene jeg antar påvirker resultatene mest og som det kan knyttes en del usikkerhet rundt. Sammen med dette vil jeg kritisere eget arbeid og komme med forbedringsforslag.

## 6.1 Vannføring

Vannføringsberegningene er hentet fra NEVINA, som primært baserer beregningene på historiske data fra 1960 til 2000. Nøyaktigheten til tallene er ikke kvantifisert, og i brukerveiledningen til NEVINA står det at brukeren må selv vurdere rimeligheten til de genererte dataene (NVE, 2015). Lavvannføringen beregnes ut fra målinger fra 318 stasjoner, der kvaliteten av målingene vurderes i Figur 3-10. Nedbørsdataene som vannføringen ved flomhendelser beregnes ut fra står det ingenting om, annet enn at de er hentet fra Meteorologisk Institutt. Det står ingenting spesifikt om verdiene med klimapåslag, så derfor antar jeg at de også er basert på klimamodeller hentet fra samme kilde (Engeland et al., 2008).

Flomverdiene er beregnet fra omtrent der inngangen til stikkrennene under nye E6 ligger. Dette ble gjort fordi det først var tiltenkt en analyse som primært viste forskjeller på flomsoner ved åpne og tette stikkrenner, og dermed var ikke området nedenfor dette punktet så interessant. I Vedlegg D - Rapport fra NEVINA vises rapporten fra denne beregningen. Jeg gjorde likevel en ny beregning i NEVINA for hele nedbørsfeltet som vises i Vedlegg E - Rapport fra NEVINA 2. Her beregnes verdien for 100-årsflom til å være  $4,1 \text{ m}^3/\text{s}$ , hele  $1,3 \text{ m}^3/\text{s}$  mer enn det som beregnes i første rapporten. Det kommer nok av et tilsig fra en ny sideelv til Brandrudsåa som ikke inkluderes i den første rapporten. En sammenligning av flomsoner ved vannføring på  $2,8$  og  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  ligger i Vedlegg F. I dette kartet kommer det frem at differansen mellom de to modellene er minimal, og derfor har jeg sett bort fra denne forskjellen når jeg har presentert resultatene mine.

Under arbeidet fattet jeg også mistanke om at HEC-RAS kjører en konstant vannføring gjennom hele modellen. Med det menes at øverste og nederste del av elveløpet ble modellert etter samme vannføring. Dette vil føre til en større vannføring øverst i vassdraget enn det som forekommer naturlig, mens den vil ligge nærmere virkeligheten i den nederste delen.

Mønsteret bekreftes langt på vei i resultatene, der en ser i gjennomgående grad at område 1 og

2 holder en høyere vannføring enn det som er synlig i bildene som er tatt. Problemet gjelder spesielt oppstrømsiden i område 1. Her dekker vannet et veldig stort område i forhold til det som kan bekreftes gjennom bilder og skadedata. Område 3 ligger et lite stykke nedenfor 1 og 2. Beregningene i dette området virker ikke overdrevne med tanke på hva som står beskrevet om skadepunktene. Slik jeg tolker beskrivelsene var det store deler av jordet og infrastruktur rundt som ble dekket og ødelagt av flomvann og -sedimenter. Flomberegningene med klimapåslag var ganske nære denne beskrivelsen, mens modellene for 100-årsflom virker litt konservative i forhold. Område 4 og 5 virker generelt å ligge ganske nære virkeligheten, spesielt TIN-modellene. Noen avvik er det, men de er ikke like ekstreme som ved område 1 og 2. Igjen kan dette forklares med at den modellerte vannføringen representerer disse områdene bedre enn de som ligger lenger opp i elveløpet. Så vidt jeg forstår verken bekrefter eller avkrefter manualene om denne teorien stemmer.

En løsning på dette problemet kan være å kjøre en *unsteady flow*-beregning, fremfor *steady flow*. Ved en slik modellering kan det legges inn nedbørsverdier og middelvannføring for å beregne flomsoner ved en gitt nedbørshendelse. Denne analysen krever mer data, blant annet hydrografer, og er dermed mer kompleks og tidkrevende enn en *steady flow*-modellering (Ackerman, 2012). Det er heller ingen klare svar på hvilken metode som er best for hvilke situasjoner (Ponce, 2018). Under datainnsamlingen opplevde jeg også hvor vanskelig det var å få tak i data for nedbør helt ned på timesintervall. Nærmeste målestasjon for denne typen data ligger i Fåvang, omtrent 19 km i luftlinje sør for studieområdet. Siden styrtflommer gjerne oppstår av lokale nedbørshendelser kan beliggenheten være langt nok unna til at nedbørsverdiene fra denne stasjonen ikke representerer Brandrudsåa godt nok, noe som igjen kunne ført til unøyaktige modeller hadde verdiene blitt brukt i en *unsteady flow*-modellering. På bakgrunn av dette falt valget på å kjøre en *steady flow*-analyse.

En annen måte å forbedre modellen på kunne vært å dele den opp i mindre deler basert på områdene som skal undersøkes. En måte å gjøre det på er for eksempel å digitalisere elva i flere deler med område 1 og 2, så område 3 og 4, og til slutt nummer 5, for deretter å beregne vannføring i NEVINA på de forskjellige punktene. Etterpå kan det kjøres *steady flow*-beregninger i HEC-RAS med den beregnede vannføringen for hvert område. Modellen vil dermed ikke dekke vassdraget i sin helhet, men jeg antar at en sitter igjen med verdier for vannføring som bedre representerer de områdene som skal undersøkes. Det ble ikke gjort i denne oppgaven fordi jeg ikke var klar over problemstillingen før på et sent stadium. Dermed

konkluderte jeg med at det var for lite tid til å gå tilbake for å modellere hvert enkelt område individuelt.

## 6.2 Problemer og utfordringer med HEC-programvaren

Under digitaliseringen og tildelingen av egenskaper til lagene i ArcMap/HEC-GeoRAS har jeg støtt på flere problemer underveis. Problemene har dukket opp enten under digitaliseringen, eller etter eksporteringen til HEC-RAS. Mange av de har vært veldig tidkrevende fordi de samme feilene gjerne har dukket opp flere ganger før det har kommet en løsning.

### 6.2.1 Tverrsnitt

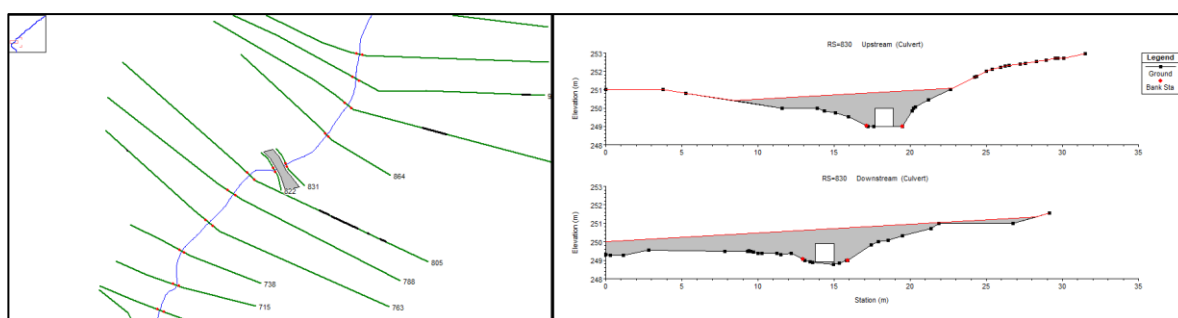
Tverrsnitt er viktig for beregninger i HEC-RAS. Siden tverrsnitt begrenser området for flomanalyse (Figur 4-22), er det viktig med god plassering og lengde på tverrsnittene. Som anbefalinger for tverrsnitt står det at de burde dekke hele elvesletta og være vinkelrett til elvekanalen. I et bratt vassdrag er det ingen tydelig elveslette, så det å vite hvor lange tverrsnittene skal være har vært vanskelig. Digitaliseringen har derfor skjedd på en skyggerelieffmodell, hvor det er enklere å se små forandringer i terrenget enn ved tradisjonelle terrengmodeller. Dette betyr at lengden på tverrsnittene er kun et estimat. Distansen mellom tverrsnittene ligger jevnt over på mellom 20 og 30 meter. Den romlige fordelingen av tverrsnittene i denne oppgaven er jeg fornøyd med. Kun én gang fikk jeg en feilmelding relatert til dette, som ble rettet opp ved å legge til noen nye tverrsnitt. Ingen andre problemer som bunner i for kort eller lang avstand mellom tverrsnitt har tilsynelatende dukket opp under analysen.

Noen tverrsnitt var tydelig for lange, da flomsonekartene noen steder viste dammer som oppsto et godt stykke utenfor elvekanalen. Eksempler er flomsonekartene for område 2 der det er en vanndam nord for gårdstunet, og Figur 4-24 som dekker område 5. Dette kommer nok av at de punktene ligger lavere i tverrsnittene enn elvekanalen, som vist i Figur 4-23. Problemet dukket opp ganske sent i prosessen, da tiden var en begrensende faktor. Derfor valgte jeg å kutte de berørte tverrsnittene i HEC-RAS fremfor å gå tilbake og digitalisere de nøyere i ArcMap. Hadde jeg gått tilbake måtte alle lagene fått tildelt egenskaper på nytt, laget ny eksportfil til HEC-RAS, for så å begynne på en ny runde med innskriving av data for bruer og stikkrenner før flommodelleringen. En slik liten redigering ville derfor vært tidkrevende, så det var mer effektivt å kutte de i HEC-RAS. Det ville dessuten ikke vært noen garanti for at

resultatene ville vært noe bedre enn de jeg allerede hadde, slik at prosessen eventuelt måtte startes på nytt igjen. Det er samtidig mulig å argumentere for at en sånn samling av vann kan forekomme ved en flomhendelse, men jeg tok vurderingen om at dette gikk på bekostningen av hvor mye vann som samles i kanalen, jamfør Figur 4-24.

I område 5 ser en også at noen tverrsnitt var for korte. Flomsonekartene har en brå avslutning på vestsiden som skyldes for korte tverrsnitt, siden tverrsnittene bestemmer grensen for flomanalysen. Dette ble ikke endret på av samme grunn som forkortingen i forrige avsnitt. I min analyse har nok ikke dette hatt noe å si for resultatene og sammenligningsgrunnlaget.

## 6.2.2 Bruer og stikkrenner



Figur 6-1: (Venstre) Stikkrenne i grått med to tilgrensende tverrsnitt. (Høyre) Tverrprofil av samme struktur sett fra opp- og nedstrøms tverrsnitt.

I forbindelse med bruer og stikkrenner var det litt usikkerhet knyttet til lengden til de tilgrensende tverrsnittene, siden jeg forsto det som at bredden på strukturen ble bestemt av de kringliggende tverrsnittene. Dette viste seg å være delvis sant. I Figur 6-1 til venstre ser en at bredden til stikkrenna i grått er lik bredden til tverrsnittene opp- og nedstrøms. Samtidig ser en i samme figur til høyre at veidekket går «under» tverrsnittet oppstrøms på høyre og venstre side av inngangen til stikkrenna. Dermed vil strukturens bredde også bestemmes ut fra høyden til veidekket sammenlignet med høyden til tverrsnittet. Ut fra manualen av Ackerman (2012) forstod jeg det også som at bredden til stikkrennenes inngang ble bestemt ut fra lengden til tverrsnittene. Etter å ha forsøkt et par ganger å tegne inn strukturene med ArcMap/HEC-GeoRAS ble det klart at det ville være enklere og mer effektivt å redigere de i HEC-RAS i stedet. Derfor ble det gjort en avgjørelse om å angi dimensjonene til stikkrennene og bruene der, fremfor å tegne inn et estimat av bredden med verktøy i ArcMap.

Verdiene for strukturene er det mulig å undersøke nærmere. Med henblikk på delkapittel 4.4.1.3 ble ikke alle verdiene målt under feltarbeidet. Hadde jeg vært klar over alle variablene som følger med modellering av stikkrenner under undersøkelsene, ville det blitt gjort målinger

som kunne lettet arbeidet ved valg av verdier. Sånn som de står i oppgaven er en del av deres egenskaper kun et estimat basert på terrengmodellen og digitale kart, målinger av andre stikkrenner, og verdier som blir nevnt og anbefalt i manualene. Det er vanskelig å si noe om effekten av bruk av estimerte verdier i resultatene av analysen.

### 6.2.3 Stasjonering av elvenettverket og tverrsnittene

De første gangene elvenettverket ble digitalisert for bruk i HEC-RAS tegnet jeg inn hele nettverket, inkludert sideelvene. På dette stadiet dukket det opp flere problemer underveis, der noen av problemene var under attribueringen av elvenettverket. Her skal det på et tidspunkt blant annet legges inn stasjoner. Stasjoner i elvenettverket er det som bestemmer plasseringen til resten av lagene langs elvenettverket, bl.a. *river station* for tverrsnitt (forklart i delkapittel 4.3.4). I attributtabelen til elvenettverket ble det oppdaget en feil. I tabellen oppgis hvilken stasjon hver elv renner fra (*FromSta*) og til (*ToSta*). Etter at verdiene ble beregnet med HEC-GeoRAS var det flere av verdiene som manglet i tabellen (Figur 6-2). De verdiene som ble beregnet hadde «0» som *FromSta*, og *ToSta* var samme verdi som *ArcLength*, bare med to desimaler. Etter flere nye forsøk på en automatisk beregning av verdiene ble det besluttet å skrive de inn manuelt. Jeg fulgte dermed samme mønster for de manglende verdiene som de som hadde blitt beregnet. Problemet kan ha oppstått på grunn av en misforståelse om hvordan kryss fungerer, da hovedkanalen først ble tegnet inn som en sammenhengende strek. Det ble forsøkt rettet opp ved å dele opp hovedkanalen i flere deler så det sammenfalt med der den møter sideelver (se delkapittel 4.3.2). Etter ny tildeling av identifikatorer for elvenettverket og ny runde med attribuering var problemet fortsatt der, så jeg holdt fast ved å skrive inn verdiene manuelt.

Shape *	OID *	Shape Length	HydroID	River	Reach	FromNode	ToNode	ArcLength	FromSta	ToSta
Polyline	1	4035.969716	1	Brandrudsaa	Main	1	2	4035.97	0	4035.97
Polyline	5	1469.698417	5	Brandrudsaa	Upper_E	3	4	1469.7	<Null>	<Null>
Polyline	16	414.446702	16	Brandrudsaa	Small_trib	5	6	414.446	<Null>	<Null>
Polyline	19	348.493399	18	Brandrudsaa	Trilla1	7	8	348.493	<Null>	<Null>
Polyline	21	614.047433	20	Brandrudsaa	Trilla2	9	10	614.047	<Null>	<Null>
Polyline	22	1767.487229	21	Brandrudsaa	Trilla3	11	12	1767.487	0	1767.48
Polyline	25	2102.766141	24	Brandrudsaa	Trib_NE	13	14	2102.766	<Null>	<Null>
Polyline	27	467.948498	26	Brandrudsaa	Trib_SE	15	16	467.948	<Null>	<Null>

Figur 6-2: Attributtabelen for elvenettverket. «FromSta» og «ToSta» helt til høyre.

Det dukket opp en ny feil som ikke ble oppdaget før stikkrennene skulle modelleres i HEC-RAS. Når posisjonen til ei stikkrenne blir bestemt vil programmet opplyse om distansen mellom tverrsnittene opp- og nedstrøms for stikkrenna. I øverste del av hovedkanalen fikk jeg normale verdier (for eksempel 10 m) for denne distansen. Litt lenger ned ble det oppdaget at distansen mellom var usannsynlig høy: 2 til 4 km. Denne feilen var også tydelig i attributtabelen for tverrsnittene (Figur 6-3). Det er usikkert hvorfor denne feilen oppstod,

men antakeligvis er det fordi strømningslinjene ble digitalisert etter tverrsnittene. På et senere stadium ble det oppdaget at strømningslinjene skal digitaliseres før tverrsnittene, kun nevnt i en bisetning i manualen skrevet av Ackerman (2012). Dette kommer nok av at nedstrøms lengde mellom tverrsnittene bestemmes av strømningslinjene. Strømningslinjene ble slettet og lagt inn på nytt for å forsøke å rette det opp, men det samme problemet oppstod fortsatt. Jeg forstod dermed at tverrsnittene også måtte legges inn på nytt. På grunn av problemene med stasjonering av elvenettverket og nedstrøms lengde for tverrsnitt ble det besluttet å ikke digitalisere hele elvenettverket på nytt. På dette stadiet hadde det allerede blitt gjort det flere ganger for å forsøke å rette opp småfeil. For å sikre meg at problemene ikke skulle vedvare ble det bestemt å kun digitalisere en liten del av hovedkanalen. Vannføringen ville uansett være beregnet av NEVINA, så det aspektet ville heller ikke være et problem.

Shape *	OID *	Shape_Length	HydroID	Station	River	Reach	LeftBank	RightBank	LLength	ChLength	RLength	NodeName
Polyline	31	175.800726	77	3357.379	Brandrud	Main	<Null>	<Null>	0	46.933	0	<Null>
Polyline	32	228.031815	78	3310.446	Brandrud	Main	<Null>	<Null>	0	24.485	0	<Null>
Polyline	33	228.474323	79	3285.961	Brandrud	Main	<Null>	<Null>	0	28.37	0	<Null>
Polyline	34	202.063128	80	3257.591	Brandrud	Main	<Null>	<Null>	0	39.655	0	<Null>
Polyline	36	130.347343	82	3217.936	Brandrud	Main	<Null>	<Null>	0	50.645	0	<Null>
Polyline	38	98.330034	84	3167.291	Brandrud	Main	<Null>	<Null>	0	37.432	0	<Null>
Polyline	39	104.173428	85	3129.859	Brandrud	Main	<Null>	<Null>	0	22.172	0	<Null>
Polyline	40	131.242082	86	3107.688	Brandrud	Main	<Null>	<Null>	0	31.165	0	<Null>
Polyline	42	127.62846	88	1458.668	Brandrud	Upper_E	<Null>	<Null>	0	4050.542	0	<Null>
Polyline	43	113.439004	89	1437.299	Brandrud	Upper_E	<Null>	<Null>	0	1780.628	0	<Null>
Polyline	44	109.69463	90	1417.928	Brandrud	Upper_E	<Null>	<Null>	0	3.512	0	<Null>
Polyline	45	161.499913	91	1375.174	Brandrud	Upper_E	<Null>	<Null>	0	4040.622	0	<Null>
Polyline	46	227.63164	92	1338.252	Brandrud	Upper_E	<Null>	<Null>	0	1785.851	0	<Null>
Polyline	47	239.490017	93	1309.053	Brandrud	Upper_E	<Null>	<Null>	0	4047.131	0	<Null>
Polyline	48	236.947029	94	1282.471	Brandrud	Upper_E	<Null>	<Null>	0	4041.735	0	<Null>
Polyline	50	247.776083	96	1232.276	Brandrud	Upper_E	<Null>	<Null>	0	4044.723	0	<Null>

Figur 6-3: Utdrag av attributtabelen for tverrsnitt. Eksempel på ekstreme verdier for distanse mellom tverrsnitt markert i rød, stiplet linje.

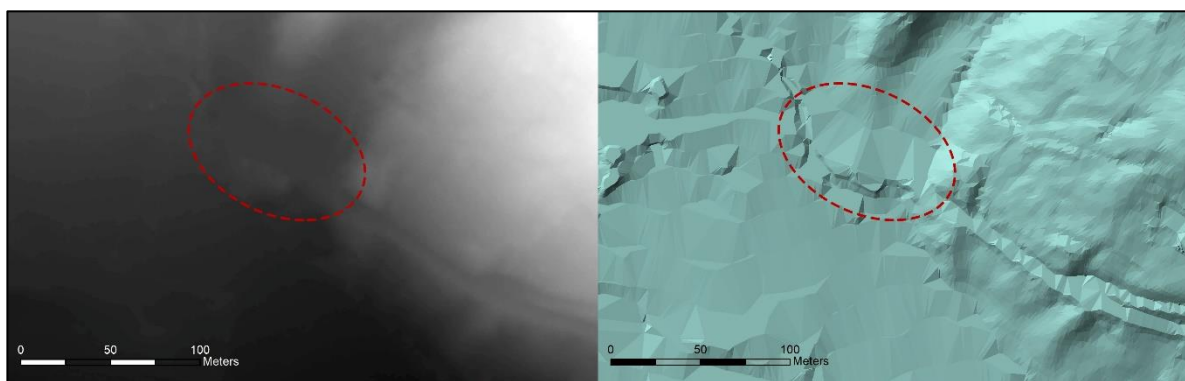
## 6.2.4 Andre utfordringer

Gjennom arbeidet med HEC-programvaren har det til stadighet dukket opp små problemer som har vært tidstyver. Dette er gjerne problemer som i utgangspunktet er bagateller, men som har gjentatt seg flere ganger og derfor brukt opp mye tid. HEC-RAS godtar kun punktum (.) som desimaltegn, og starter faktisk ikke opp før man har endret til punktum som standardtegn. I starten ble arbeidet utført på datamaskiner driftet av universitetet på GIS-laboratoriet på Dragvoll, der standardtegnet for desimaler er komma (,). Det er ikke noe problem å endre på dette i innstillingene til maskinen, og etter å ha endret til punktum startet jeg opp HEC-RAS. Etter hvert ble det oppdaget at maskinen endrer standardtegnet tilbake til komma etter en liten stund, slik at alle verdiene i HEC-RAS blir feil. Etter flere forsøk på å rette det opp var verdiene var fortsatt feilaktige. Det kommer nok av det er en offentlig maskin med standardinnstillinger administrert av universitetet. Det ble derfor bestemt å starte på nytt på en privat PC. Et annet problem som til stadighet dukket opp var feil projeksjon når RAS-lagene ble importert inn til HEC-RAS. Konsekvensen var at linjene og punktene helt

tydelig ble projisert feil. Løsningen ble dermed å starte opp et nytt prosjekt i HEC-RAS og angi projeksjonen som skulle vises. Her er det mulig å bruke de projeksjonsfilene som brukes i ArcGIS-programpakken. Filene ligger i en skjult mappe, så en må vite hvordan man får tilgang til mappene for å kunne hente de ut. I tillegg fant jeg den kun ved å legge den til som en favoritt i ArcMap først. Det finurlige er at dette problemet ikke oppstod hver gang det ble importert inn data til HEC-RAS, men det var uansett ikke et problem så lenge projeksjonen ble angitt før dataene ble importert.

### 6.3 Terrengmodell

Resultatene ser ut til å støtte teorien presentert av Hengl og Evans (2009) om at TIN er generelt sett bedre egnet enn GRID til å presentere og modellere hydrologiske data. Likevel finnes det også en sannhet i det Moore et al. (1991) sier om at den kan kreve en del modifiseringer, spesielt i flate områder. I Figur 6-4 vises nedre del av område 5. Inngangen til stikkrenna under nye E6 er inne i den røde sirkelen. Her vises tydelig forskjellen på GRID og TIN på flatt terreng. Der GRID har en tilsynelatende jevn og fin overflate har TIN-modellen flere flater med tydelige brekklinjer. I nedre del av sirkelen er det også flere brekklinjer i TIN-modellen, som ser ut til å være den sydlige grøfta til Eksisvegen. Her virker det som GRID-modellen overdriver høyden siden en ser tydelige hvite piksler. Det tyder på en overrepresentasjon av punkter slik som beskrevet i delkapittel 3.4.2. Slike små detaljer kan gi utslag når det er snakk om modellering av vann.



Figur 6-4: Detalj fra område 5 med GRID til venstre og TIN til høyre.

Et annet problem med DTM-ene i denne analysen er at lasermålingene er gjort før nye E6 er bygget. I flomsonekartene for område 5 flommer vannet over der det i dag ligger en motorvei. Det kan muligens rettes på ved hjelp av ellevoller eller strukturer inne i elveløpet (*inline structures*) i HEC-RAS. Ellevoller bestemmer når vann ikke skal overstige en topp i profilen langs tverrsnittet, men om det da fungerer på tvers av elveløpet er usikkert. Strukturer i

elveløpet kan også settes inn, men det er uvisst om det er mulig å sette de inn der det allerede er ei stikkrenne, siden de modelleres på samme måte (Ackerman, 2012). Det er i tillegg en mulighet å redigere selve terrengmodellen gjennom å legge til brekklinjer der den nye infrastrukturen er bygget. Det ble gjort en vurdering om at redigering av terrengmodellen, samt innhenting av data som krevdes, ble for tidkrevende. Likevel mener jeg det ikke har gjort så stort utfall for resultatene, i alle fall ikke på de områdene jeg har brukt som analysegrunnlag. Figur 5-43 (bilde 5) i område 5 viser tydelig at vannstanden har vært høyere enn den som ble modellert, men dette behøver ikke kun være på grunn av mangler i terrengmodellen. Som diskutert i delkapittel 5.6.1 kommer det inn en sideelv her som ikke er modellert, og denne tilfører dermed vann til området som ikke er med i analysen.

## 6.4 Sammenligningsmetode

Validering av flomsonekartene i denne analysen skjer gjennom sammenligning med skadepunkter og bilder. Den romlige plasseringen til skadene er kun basert på punkter, og ikke polygoner. Det betyr at en er avhengig av å tolke skadebeskrivelsene rett for å validere flommodellene. Noen av beskrivelsene er ikke like enkle å forstå, da himmelretningen til skadeområdene ikke blir nevnt. Et eksempel er plastringen i område 3, hvor det ikke blir spesifisert hvilket beite det er snakk om i skadebeskrivelsen. Det er ikke alltid oppgitt hva som er skadeårsaken, altså om det er massetransport og avsetninger eller flomvann/overvann som utgjør mesteparten av skadene. Flommodellene viser jo hvor flomvannet går, men sier ingenting om eventuell massetransport. Konsekvensen av dette er at det er vanskelig å kunne trekke veldig tydelige konklusjoner ut fra denne sammenligningen, men man kan likevel med en viss sikkerhet gjøre noen antakelser.

Som nevnt tidligere ble bildene tatt under mine egne feltundersøkelser. Bildene ble ikke tatt med tanke på at de skulle danne et sammenligningsgrunnlag for en flommodell, men heller at de skulle gi et inntrykk av området. Alle bildene er derfor ikke optimale som sammenligningsgrunnlag. Det kunne for eksempel vært interessant å ha bilder fra jorden i område 3 eller fra skadepunktet i område 1. Det finnes faktisk bilder fra dette skadepunktet, men de er av for dårlig kvalitet til å brukes i en sammenligning. Dermed kan det være lurt å ta bilder etter at modellen er laget, slik at en vet bedre hva man skal se etter. Når en studerer flommodellene vil det være flere steder det kunne vært interessant å dokumentere. Blir modellen laget først vil det være lettere å identifisere hvilke områder som skal fotograferes.



For å i det hele tatt ha bilder å sammenligne med er man avhengig av å kunne ta de rett etter en flomhendelse. Hvis en ikke har dette selv er det helt avgjørende at man finner bilder, og ikke minst får oppdrevet en tillatelse til å bruke bildene. Bildene som eventuelt blir funnet bør kunne stedfestes ganske nøyaktig. Det fulgte med bilder sammen med skadepunktkartet, men det står ingenting nøyaktig om hvor bildene er tatt, ei heller hvem som har tatt de og hvor en kan henvende seg for å bruke dem. Jeg var selv veldig heldig med akkurat dette, siden det nettopp hadde vært en flom da jeg var der for å gjøre undersøkelser.

## 6.5 Forslag til videre arbeid

Om det blir bestemt at en skal bruke HEC-RAS som metode på et tidligere stadium enn meg selv, vil jeg tro det er mulig å oppnå resultater med større sikkerhet. Da kan det gjøres feltundersøkelser som er mer spisset mot dette, enten det er snakk om bilder for sammenligning eller flere målinger av stikkrennene og området rundt det. Det vil da også være bedre tid til å forbedre, endre og sammenligne de geometriske dataene som digitaliseres, sånn som for eksempel tverrsnitt.

Mannings  $n$ -verdier kan baseres mer på egne målinger, men dette krever en del forarbeid og kan dermed ta for lang tid. Om terrengmodellen fortsatt er bygget ut fra gamle Lidar-data, er det også mulig å ta med elvevoller og *inline structures* som en del av de geometriske lagene for å se om de kan brukes til å simulere de nye strukturene bygget i elveløpet ved nye E6.

En interessant problemstilling å forske på vil være å vurdere egnetheten til en *steady flow*-sammenlignet med en *unsteady flow*-modellering. *Unsteady flow* er tidkrevende og krever en del mer data enn en *steady flow*-modellering, men her er det mulig å legge inn nedbørsdata fra virkelige hendelser. Det vil derfor være interessant å sammenligne de to modellene og se om én metode gir mer virkelighetsnære resultater enn den andre.

Som diskutert i siste avsnitt i delkapittel 6.1, ville en oppgave som ser på vannføringen beregnet for hvert område også vært interessant. En kan se på flommer med og uten klimapåslag, og eventuelt sammenligne de med flommodeller med konstant vannføring.

Det ville også vært interessant å kombinere noen av de ovennevnte forskningsspørsmålene sammen med en analyse av overvann på grunn av tetting av stikkrenner. I HEC-RAS er det ikke mulig å tette stikkrennene fullstendig, men det er mulig å tette de nesten helt igjen. Dette bestemmes av *depth blocked*, som vises i Figur 4-19. Stikkrenna i denne figuren har en diameter på 2 meter. Settes *depth blocked* til eksempelvis 1,9 meter betyr det at det kun er 0,1

meter med luft under taket som vannet kan renne gjennom. Et kart med sammenligning av flommodeller med og uten blokkerte stikkrenner finnes i Vedlegg G.

*Steady flow*-modellering har en begrensning på 1:10 (ca. 5,7 grader) som helningsgradient. Er helningen større enn dette vil det oppstå feil i den beregnede vanndybden. Det kan være mulig å unngå det ved å dele den beregnede vanndybden på den trigonometriske funksjonen  $\cos(\theta)$ . En oppgave som sammenligner de beregnede flommodellene med og uten denne funksjonen i Brandrudsåa kan være interessant, da dette er et bratt vassdrag. En liten gjennomgang av denne problemstillingen med de forskjellige verdiene for  $\cos(\theta)$  finnes i Brunner (2016) side 2-20 og 2-21.

## Kapittel 7 - Konklusjon

---

HEC-RAS er i utgangspunktet best egnet for å modellere elver som renner gjennom et relativt flatt terreng, opp til 1:10 (5,7 grader), og Brandrudsåa er brattere enn dette de fleste steder. Likevel vil jeg si at resultatene jeg har oppnådd i programmet er ganske gode. Ser en for eksempel på område 3 og 4, steder med ganske stor helningsgradient, later det til at resultatene slettes ikke er langt unna å gjenspeile virkeligheten. Beskrivelsen av skadene og de flomsonene som blir beregnet i modellen virker å sammenfalle i stor grad. I område 5 virker resultatene veldig realistiske. Vann dekker store deler av området, og det til og med uten tette stikkrenner og sideelver som treffer samme område. Det skal også da bemerkes at dette området er det flateste, slik at HEC-RAS passer denne typen terreng bedre. HEC-RAS er dermed ganske godt egnet til modellering av små, bratte vassdrag, til og med uten bruk av den trigonometriske funksjonen  $\cos(\theta)$ .

Terrengmodellene vil ha en del å si for resultatene i en slik modellering, da vann er styrt av tyngdekraft og brer seg utover de områdene det kan nå. For Brandrudsåa, som renner gjennom et bratt terreng, virker TIN for å være en bedre GIS-representasjon enn GRID for hydrologiske modelleringer. I alle fokusområdene i resultatene ser TIN-modellene ut til å sammenfalle mye bedre med både skadepunkter og de bildene jeg selv har tatt. GRID ser imidlertid ut til å ligge nærmere virkeligheten i område 5 enn i de andre områdene. Grunnen til dette ligger nok i egenskapene til TIN og GRID i flate terreng. En kan derfor konkludere med at TIN-modeller fungerer bedre generelt, mens GRID kanskje passer bedre til veldig flatt terreng. Hvor denne grensen går er det derimot vanskelig å si noe om, og ser en Brandrudsåa under ett er TIN helt klart å foretrekke, til og med i de flateste partiene nederst i elva.

Det er vanskelig å trekke endelige konklusjoner av problemstillingene i denne analysen, siden resultatene i hydrologiske modeller blir bestemt av så mange variabler i forskjellig grad.

Bedre geometriske data og bedre data for vannføring fra hvert område er grep som nok ville gjort meg mer tilfreds med de resultatene jeg har oppnådd. I tillegg er dette mitt første møte med HEC-RAS, og har derfor måttet lære programmet innen relativt kort tid. HEC-RAS er et såpass krevende program at det er vanskelig å vite nøyaktig hva alle valgene som skal gjøres underveis har å si for resultatet. Likevel er jeg godt fornøyd med resultatene jeg har fått, og mye tyder på at en del av resultatene mine ikke er så fjernt fra virkeligheten. Jeg tror derfor at

mer arbeid i HEC-RAS, både av undertegnede og andre, vil kunne gi en bedre forståelse av hvilke metoder som fungerer for ulike typer vassdrag.

## Referanser

---

- Ackerman, C. T. (2012) *HEC-GeoRAS. GIS tools for support of HEC-RAS using ArcGIS. User's manual.*, Davis, CA: Hydrologic engineering center.
- Almehagen, E. (2017) *Stengte E6 i åtte timer som følge av voldsomt nedbør: Gudbrandsdølen dagningen* [Figur]. Tilgjengelig fra: <https://www.gd.no/nyheter/trafikk/e6/stengte-e6-i-atte-timer-som-folge-av-voldsomt-nedbor/s/5-18-479817> (Hentet: 26. april 2018).
- Amundsen, B. (2012) *Mer regn i framtiden: Norges forskningsråd*. Tilgjengelig fra: <http://forskning.no/klima-vaer-og-vind-eu/2012/07/mer-regn-i-framtiden> (Hentet: 19. oktober 2017).
- Arcement, G. J. og Schneider, V. R. 1989. Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains. US Government Printing Office Washington, DC.
- Brunner, G. W. (2016) *HEC-RAS river analysis system. Hydraulic reference manual. Version 5.0*, Davis, CA: Hydrologic engineering center.
- Brunner, G. W., Warner, J. C., Wolfe, B. C., Piper, S. S. og Marston, L. (2016) *HEC-RAS, river analysis system applications guide*, Davis, CA: Hydrologic engineering center.
- Carlson, T. N. (2004) 'Analysis and prediction of surface runoff in an urbanizing watershed using satellite imagery', *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 40(4), s. 1087-1098.
- Childs, C. (2004) 'Interpolating surfaces in ArcGIS spatial analyst', *ArcUser, July-September*, 3235, s. 569.
- Chow, V. T. (1959) *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill Book Company, Inc; New York.
- CivilGEO (2018) *HEC-RAS contraction and expansion losses* [Figur]. Tilgjengelig fra: <https://www.civilgeo.com/knowledge-base/hec-ras-contraction-expansion-losses/> (Hentet: 12. april 2018).
- Deems, J. S., Painter, T. H. og Finnegan, D. C. (2013) *Lidar measurement of snow depth: a review*: ResearchGate [Figur].
- Dick, Ø. B. (2018) *Fotogrammetri: Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/fotogrammetri> (Hentet: 22. februar 2018).
- El Kateb, H., Zhang, H., Zhang, P. og Mosandl, R. (2013) 'Soil erosion and surface runoff on different vegetation covers and slope gradients: A field experiment in Southern Shaanxi Province, China', *CATENA*, 105, s. 1-10.
- Engeland, K., Hisdal, H., Orthe, N. K., Petersen-Øverleir, A. og Voksø, A. (2008) *Lavvannskart for Norge*, Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat (5, 2008).
- Esri (2016a) *How raster to TIN works*: Esri. Tilgjengelig fra: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/how-raster-to-tin-works.htm> (Hentet: 5. april 2018).
- Esri (2016b) *LAS dataset to raster function*: Esri. Tilgjengelig fra: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/las-dataset-to-raster-function.htm> (Hentet: 4. april 2018).
- Esri (2016c) *Understanding interpolation analysis*: Esri. Tilgjengelig fra: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/understanding-interpolation-analysis.htm> (Hentet: 22. februar 2018).
- Esri (2017a) *How fill works*: Esri [Figur]. Tilgjengelig fra: <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-fill-works.htm> (Hentet: 5. april 2018).

- Esri (2017b) *How inverse distance weighted interpolation works*: Esri. Tilgjengelig fra: <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/help/analysis/geostatistical-analyst/how-inverse-distance-weighted-interpolation-works.htm> (Hentet: 23. februar 2018).
- Esri (2017c) *How Kriging works*: Esri. Tilgjengelig fra: <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-kriging-works.htm> (Hentet: 23. februar 2018).
- Esri (2017d) *How Natural Neighbor works*: Esri. Tilgjengelig fra: <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-natural-neighbor-works.htm> (Hentet: 23. februar 2018).
- Esri (2017e) *How Spline works*: Esri. Tilgjengelig fra: <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-spline-works.htm> (Hentet: 23. februar 2018).
- Finne, T. E. (2018) *Flomsedimenter*: Norges geologiske undersøkelse. Tilgjengelig fra: <https://www.ngu.no/emne/flomsedimenter> (Hentet: 6. april 2018).
- Georgakakos, K. P. (1986) 'On the design of national, real-time warning systems with capability for site-specific, flash-flood forecasts', *Bulletin of the American Meteorological Society*, 67(10), s. 1233-1239.
- Gruber, S. og Peckham, S. (2009) 'Chapter 7 Land-Surface Parameters and Objects in Hydrology', i Hengl, T. & Reuter, H.I. (red.) *Developments in Soil Science*: Elsevier, s. 171-194.
- Harsson, B. G., Sundsby, J., Vestøl, O., Tørresen, T., Solheim, D., Pettersen, B. R. og Andersen, Ø. (2009) *Norges offisielle høydesystemer og referansenivåer*, Hønefoss: Statens kartverk.
- Hengl, T. og Evans, I. S. (2009) 'Chapter 2 Mathematical and Digital Models of the Land Surface', i Hengl, T. & Reuter, H.I. (red.) *Developments in Soil Science*: Elsevier, s. 31-63.
- Holtet, J. A. (2015) *Lidar*: Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/lidar> (Hentet: 10. januar 2018).
- Hydrologic Engineering Center (2018) *Documentation*: Hydrologic Engineering Center. Tilgjengelig fra: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation.aspx> (Hentet: 30. april 2018).
- Høydedata (2018). [hoydedata.no](https://hoydedata.no): Statens kartverk. Tilgjengelig fra: <https://hoydedata.no/LaserInnsyn/?x=229913&y=6837907&level=12&utm=33&projects=86,631&layers=&raster=8:50&background=wmtsTopo2Graatone> (Hentet: 2. april 2018).
- Kartverket (2018a) *Sentral felles kartdatabase*: Kartverket. Tilgjengelig fra: <https://www.kartverket.no/Prosjekter/Sentral-felles-kartdatabase/> (Hentet: 8. mai 2018).
- Kartverket (2018b) *Skjermdump fra norgeskart.no*: Kartverket [Figur]. Tilgjengelig fra: <http://norgeskart.no/#!?project=seeiendom&layers=1006,1015&zoom=5&lat=6747980.60&lon=121416.74&drawing=caa15f9f02fbd904455521d7122ae2436c497f86> (Hentet: 4. april 2018).
- Landbruksdirektoratet (2018) *Statens naturskadeordning*. Tilgjengelig fra: <https://www.landbruksdirektoratet.no/naturskadeordningen/> (Hentet: 19. april 2018).
- Ledoux, H. og Gold, C. (2005) 'An efficient natural neighbour interpolation algorithm for geoscientific modelling', *Developments in spatial data handling*: Springer, s. 97-108.
- Liu, X. (2008) 'Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues', *Progress in Physical Geography*, 32(1), s. 31-49.
- Marchi, L., Borga, M., Preciso, E. og Gaume, E. (2010) 'Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management', *Journal of Hydrology*, 394(1), s. 118-133.

- McBratney, A. B. (1998) 'Some considerations on methods for spatially aggregating and disaggregating soil information', *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 50(1-3), s. 51-62.
- McCullagh, M. J. (1988) 'Terrain and surface modelling systems: theory and practice', *The photogrammetric record*, 12(72), s. 747-779.
- Midttømme, G. H., Pettersson, L. E., Holmqvist, E., Nøtsund, Ø., Hisdal, H. og Sivertsgård, R. (2011) *Retningslinjer for flomberegninger*, Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat (4, 2011).
- Moore, I. D., Grayson, R. B. og Ladson, A. (1991) 'Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications', *Hydrological processes*, 5(1), s. 3-30.
- Mæhlum, L. (2016) *FKB: Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/FKB> (Hentet: 30. mars 2018).
- Nelson, A., Reuter, H. I. og Gessler, P. (2009) 'Chapter 3 DEM Production Methods and Sources', i Hengl, T. & Reuter, H.I. (red.) *Developments in Soil Science*: Elsevier, s. 65-85.
- NIBIO (2018a) *AR50: Norsk institutt for bioøkonomi*. Tilgjengelig fra: <https://www.nibio.no/tema/jord/arealressurser/ar50> (Hentet: 11. april 2018).
- NIBIO (2018b) *Dokumentasjon av AR50: Norsk institutt for bioøkonomi*. Tilgjengelig fra: <https://www.nibio.no/tjenester/nedlasting-av-kartdata/dokumentasjon/ar50> (Hentet: 11. april 2018).
- Norgebilder.no (2018): Norge i bilder. Tilgjengelig fra: <http://norgebilder.no/?x=230250&y=6837114&level=13&utm=33&projects=2424&layers=&planned=0> (Hentet: 23. april 2018).
- NVE (2008) *Flomsonkartlegging*, Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat (2, 2008). Tilgjengelig fra: [http://publikasjoner.nve.no/faktaark/2008/faktaark2008\\_02.pdf](http://publikasjoner.nve.no/faktaark/2008/faktaark2008_02.pdf).
- NVE (2015) *NEVINA lavvannsverktøy brukerveiledning*: Norges vassdrags- og energidirektorat.
- Olerud, K. (2015) *Arealavrenning*: Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/arealavrenning> (Hentet: 3. april 2018).
- Olsen, M. H., Hopland, A. A., Myrabø, S., Viréhn, P. og Glad, P. A. (2015) *Flom- og skredhendelser i Gudbrandsdalen*, Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat (123, 2015).
- Oppland fylkeskommune (2018) *Kunnskapsgrunnlag - Regional plan for Gudbrandsdalslågen med sidevassdrag*: Oppland fylkeskommune. Tilgjengelig fra: <https://www.oppland.no/Handlers/fh.ashx?Mid1=2662&FilId=6538>.
- Pirotti, F. og Tarolli, P. (2010) 'Suitability of LiDAR point density and derived landform curvature maps for channel network extraction', *Hydrological Processes*, 24(9), s. 1187-1197.
- Ponce, V. M. (2018) *Steady vs unsteady flow with HEC-RAS*: San Diego state university. Tilgjengelig fra: [https://ponce.sdsu.edu/legacy\\_tales\\_steady\\_unsteady\\_hec\\_ras.html](https://ponce.sdsu.edu/legacy_tales_steady_unsteady_hec_ras.html) (Hentet: 30. april 2018).
- Reuter, H. I., Hengl, T., Gessler, P. og Soille, P. (2009) 'Chapter 4 Preparation of DEMs for Geomorphometric Analysis', i Hengl, T. & Reuter, H.I. (red.) *Developments in Soil Science*: Elsevier, s. 87-120.
- Romano, M. E. (2004) 'Innovation in LiDAR processing technology', *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 70(11), s. 1201-1206.
- Rød, J. K. (2015) *GIS - verktøy for å forstå verden*. Bergen: Fagbokforlaget.

- Rød, J. K., Berthling, I., Lujala, P., Opach, T. og Vatne, G. (2013) 'Beregning og kartlegging av steders sårbarhet for flom, skred og storm', i Bye, L.M., Lein, H. & Rød, J.K. (red.) *Mot en farligere fremtid?* Trondheim: Akademika forlag, s. 91-107.
- Schenk, T. og Csathó, B. (2002) 'Fusion of LIDAR data and aerial imagery for a more complete surface description', *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(3/A), s. 310-317.
- Senorge.no (2018) *Regn og snøsmelting*. Tilgjengelig fra: [http://www.senorge.no/?p=senorgeny&m=bmNVEGrey%3BMapLayer\\_qtt%3B&l=no&d=1500847200000&e=196384%7C6822798%7C267504%7C6859162&fh=0%3B2468](http://www.senorge.no/?p=senorgeny&m=bmNVEGrey%3BMapLayer_qtt%3B&l=no&d=1500847200000&e=196384%7C6822798%7C267504%7C6859162&fh=0%3B2468) (Hentet: 15. april 2018).
- Statens Vegvesen (2017) *Nasjonal vegdatabank (NVDB)*: Statens vegvesen. Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/fag/teknologi/Nasjonal+vegdatabank> (Hentet: 2. april 2018).
- Statens Vegvesen (2018) *Vegkart*: Statens vegvesen. Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/fag/teknologi/Nasjonal+vegdatabank/Kart> (Hentet: 16. april 2018).
- Thorsnæs, G. (2017) *Gudbrandsdalen*: Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/Gudbrandsdalen> (Hentet: 16. november 2017).
- Tollan, A. (2009) *Hydrologi*: Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/hydrologi> (Hentet: 27. mars 2018).
- Utah State University (2015) *Terrain analysis using digital elevation models (TauDEM)*: Utah state university. Tilgjengelig fra: <http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/index.html> (Hentet: 4. mai 2018).
- Vatne, G. (2013) 'Styrtflommer og klimaendring', i Bye, L.M., Lein, H. & Rød, J.K. (red.) *Mot en farligere fremtid?* Trondheim: Akademika forlag, s. 51-67.
- Zhang, K., Chen, S.-C., Whitman, D., Shyu, M.-L., Yan, J. og Zhang, C. (2003) 'A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LIDAR data', *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 41(4), s. 872-882.



# Vedlegg A - Mannings n for elvekanaler og -sletter

Vedlegg A: Oversikt over Mannings n-verdier for elvekanaler og -sletter. Hentet fra Brunner (2016) side 3-14 og 3-15.

## Chapter 3– Basic Data Requirements

**Table 3-1 Manning's 'n' Values**

Type of Channel and Description	Minimum	Normal	Maximum
<i>A. Natural Streams</i>			
<b>1. Main Channels</b>			
a. Clean, straight, full, no rifts or deep pools	0.025	0.030	0.033
b. Same as above, but more stones and weeds	0.030	0.035	0.040
c. Clean, winding, some pools and shoals	0.033	0.040	0.045
d. Same as above, but some weeds and stones	0.035	0.045	0.050
e. Same as above, lower stages, more ineffective slopes and sections	0.040	0.048	0.055
f. Same as "d" but more stones	0.045	0.050	0.060
g. Sluggish reaches, weedy, deep pools	0.050	0.070	0.080
h. Very weedy reaches, deep pools, or floodways with heavy stands of timber and brush	0.070	0.100	0.150
<b>2. Flood Plains</b>			
a. Pasture no brush	0.025	0.030	0.035
1. Short grass	0.030	0.035	0.050
2. High grass			
b. Cultivated areas	0.020	0.030	0.040
1. No crop	0.025	0.035	0.045
2. Mature row crops	0.030	0.040	0.050
3. Mature field crops			
c. Brush	0.035	0.050	0.070
1. Scattered brush, heavy weeds	0.035	0.050	0.060
2. Light brush and trees, in winter	0.040	0.060	0.080
3. Light brush and trees, in summer	0.045	0.070	0.110
4. Medium to dense brush, in winter	0.070	0.100	0.160
5. Medium to dense brush, in summer			
d. Trees	0.030	0.040	0.050
1. Cleared land with tree stumps, no sprouts	0.050	0.060	0.080
2. Same as above, but heavy sprouts	0.080	0.100	0.120
3. Heavy stand of timber, few down trees, little undergrowth, flow below branches	0.100	0.120	0.160
4. Same as above, but with flow into branches			
5. Dense willows, summer, straight	0.110	0.150	0.200
<b>3. Mountain Streams, no vegetation in channel, banks usually steep, with trees and brush on banks submerged</b>			
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
<i>B. Lined or Built-Up Channels</i>			
<b>1. Concrete</b>			
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	
<b>2. Concrete bottom float finished with sides of:</b>			
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
<b>3. Gravel bottom with sides of:</b>			
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
<b>4. Brick</b>			
a. Glazed	0.011	0.013	0.015
b. In cement mortar	0.012	0.015	0.018
<b>5. Metal</b>			
a. Smooth steel surfaces	0.011	0.012	0.014
b. Corrugated metal	0.021	0.025	0.030
<b>6. Asphalt</b>			
a. Smooth	0.013	0.013	
b. Rough	0.016	0.016	
<b>7. Vegetal lining</b>	0.030		0.500

# Vedlegg B - Mannings n for stikkrenner

Vedlegg B: Oversikt over Mannings n-verdier inne i stikkrennene. Hentet fra Brunner (2016) side 6-26.

*Chapter 6– Modeling Culverts*

**Table 6-1 Manning's "n" for Closed Conduits Flowing Partly Full**

Type of Channel and Description	Minimum	Normal	Maximum
<b>Brass, smooth:</b>	0.009	0.010	0.013
<b>Steel:</b>			
Lockbar and welded	0.010	0.012	0.014
Riveted and spiral	0.013	0.016	0.017
<b>Cast Iron:</b>			
Coated	0.010	0.013	0.014
Uncoated	0.011	0.014	0.016
<b>Wrought Iron:</b>			
Black	0.012	0.014	0.015
Galvanized	0.013	0.016	0.017
<b>Corrugated Metal:</b>			
Subdrain	0.017	0.019	0.021
Storm Drain	0.021	0.024	0.030
<b>Lucite:</b>	0.008	0.009	0.010
<b>Glass:</b>	0.009	0.010	0.013
<b>Cement:</b>			
Neat, surface	0.010	0.011	0.013
Mortar	0.011	0.013	0.015
<b>Concrete:</b>			
Culvert, straight and free of debris	0.010	0.011	0.013
Culvert with bends, connections, and some debris	0.011	0.013	0.014
Finished	0.011	0.012	0.014
Sewer with manholes, inlet, etc., straight	0.013	0.015	0.017
Unfinished, steel form	0.012	0.013	0.014
Unfinished, smooth wood form	0.012	0.014	0.016
Unfinished, rough wood form	0.015	0.017	0.020
<b>Wood:</b>			
Stave	0.010	0.012	0.014
Laminated, treated	0.015	0.017	0.020
<b>Clay:</b>			
Common drainage tile	0.011	0.013	0.017
Vitrified sewer	0.011	0.014	0.017
Vitrified sewer with manholes, inlet, etc.	0.013	0.015	0.017
Vitrified Subdrain with open joint	0.014	0.016	0.018
<b>Brickwork:</b>			
Glazed	0.011	0.013	0.015
Lined with cement mortar	0.012	0.015	0.017
Sanitary sewers coated with sewage slime with bends and connections	0.012	0.013	0.016
Paved invert, sewer, smooth bottom	0.016	0.019	0.020
Rubble masonry, cemented	0.018	0.025	0.030

[Chow, 1959]

6-26

# Vedlegg C - Energitapskoeffisienter ved inngang

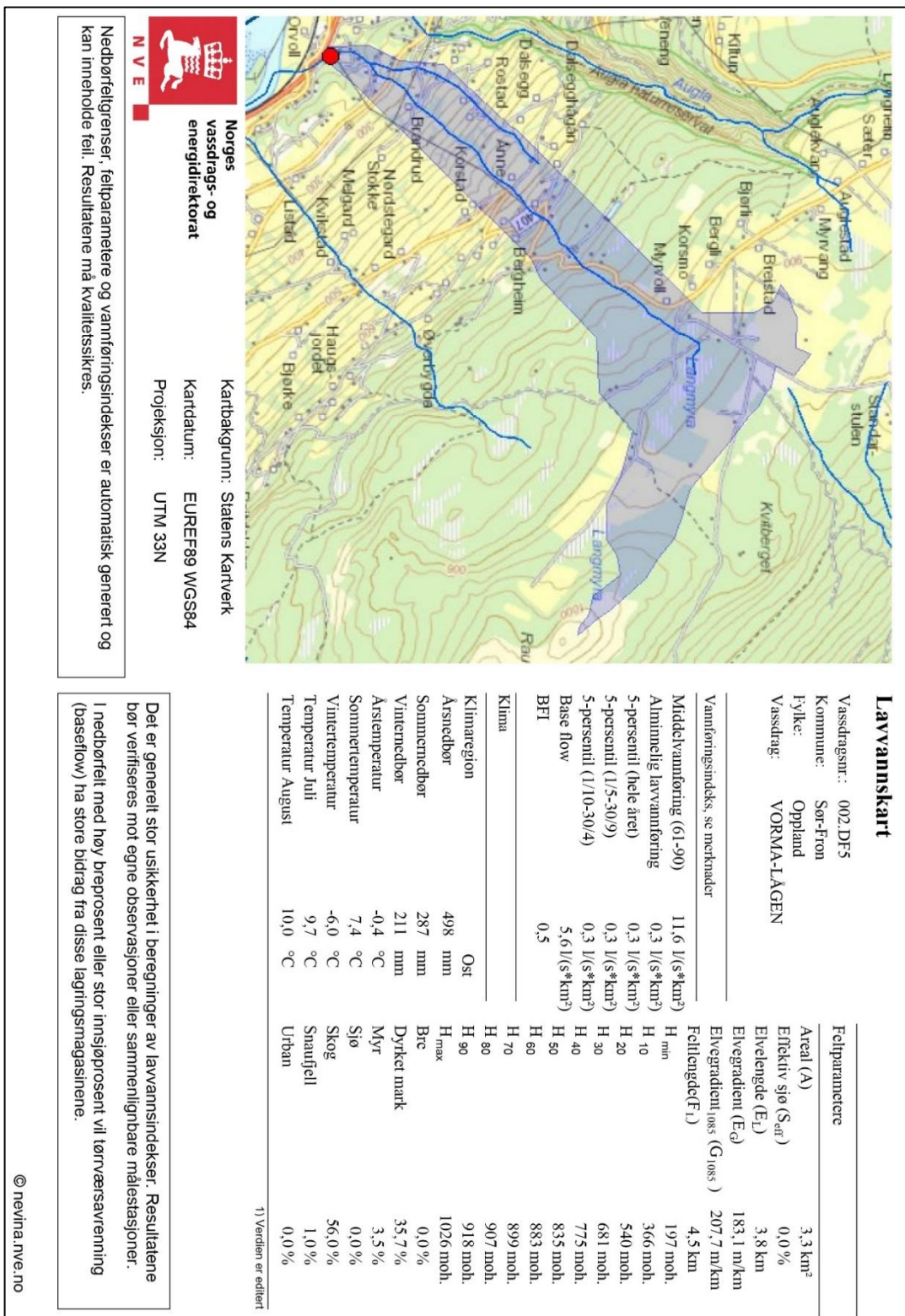
Vedlegg C: Tabell over energitapskoeffisienter ved inngangen til stikkrenner. Hentet fra Brunner (2016) side 6-28.

<i>Chapter 6– Modeling Culverts</i>	
<b>Table 6-3 Entrance Loss Coefficient for Pipe Culverts</b>	
Type of Structure and Design of Entrance	Coefficient, $k_{en}$
<b>Concrete Pipe Projecting from Fill (no headwall):</b>	
Socket end of pipe	0.2
Square cut end of pipe	0.5
<b>Concrete Pipe with Headwall or Headwall and Wingwalls:</b>	
Socket end of pipe (grooved end)	0.2
Square cut end of pipe	0.5
Rounded entrance, with rounding radius = 1/12 of diameter	0.2
<b>Concrete Pipe:</b>	
Mitered to conform to fill slope	0.7
End section conformed to fill slope	0.5
Beveled edges, 33.7 or 45 degree bevels	0.2
Side slope tapered inlet	0.2
<b>Corrugated Metal Pipe or Pipe-Arch:</b>	
Projected from fill (no headwall)	0.9
Headwall or headwall and wingwalls square edge	0.5
Mitered to conform to fill slope	0.7
End section conformed to fill slope	0.5
Beveled edges, 33.7 or 45 degree bevels	0.2
Side slope tapered inlet	0.2
<b>Table 6-4 Entrance Loss Coefficient for Reinforced Concrete Box Culverts</b>	
Type of Structure and Design of Entrance	Coefficient, $k_{en}$
<b>Headwall Parallel to Embankment (no wingwalls):</b>	
Square-edged on three edges	0.5
Three edges rounded to radius of 1/12 barrel dimension	0.2
<b>Wingwalls at 30 to 75 degrees to Barrel:</b>	
Square-edge at crown	0.4
Top corner rounded to radius of 1/12 barrel dimension	0.2
<b>Wingwalls at 10 to 25 degrees to Barrel:</b>	
Square-edge at crown	0.5
<b>Wingwalls parallel (extension of sides):</b>	
Square-edge at crown	0.7
Side or slope tapered inlet	0.2

6-28

# Vedlegg D - Rapport fra NEVINA

Vedlegg D: Rapporten produsert gjennom NEVINA frem til nederste stikkrenne ved nye E6. Danner grunnlaget for vannføring i steady flow-modelleringen.



Det er generert stor usikkerhet i beregninger av lavvannsindekser. Resultatene bør verifiseres mot egne observasjoner eller sammenlignbare målestasjoner. I nedbørfelt med høy breprosent eller stor innsjøprosent vil tørrværsavvenning (baseflow) ha store bidrag fra disse lagringsmagasinene.

# Flomberegning

Vassdragsnr.: 002.DF5

Kommune: Sør-Fron

Fylke: Oppland

Vassdrag: VORMA-LÅGEN

Flomverdiene viser størrelsen på kulminasjonsflommer for ulike gjentakelsesintervall. De er beregnet ved bruk av et formehverk som er utarbeidet for nebbøfjell under ca 50 km<sup>2</sup>. Feltparametere som inngår i formehverket er areal, effektivt støprosent og normalavrenning (l/s\*km<sup>2</sup>). For mer utdypende beskrivelse av formehverket henvises det til NYE – Rapport 7/2015 «Veileder for flomberegninger i små uregulerte felt». Det pågår fortsatt forskning for å regulere feltene. Det pågår fortsatt forskning for å regulere feltene. Det pågår fortsatt forskning for å regulere feltene. Det pågår fortsatt forskning for å regulere feltene.

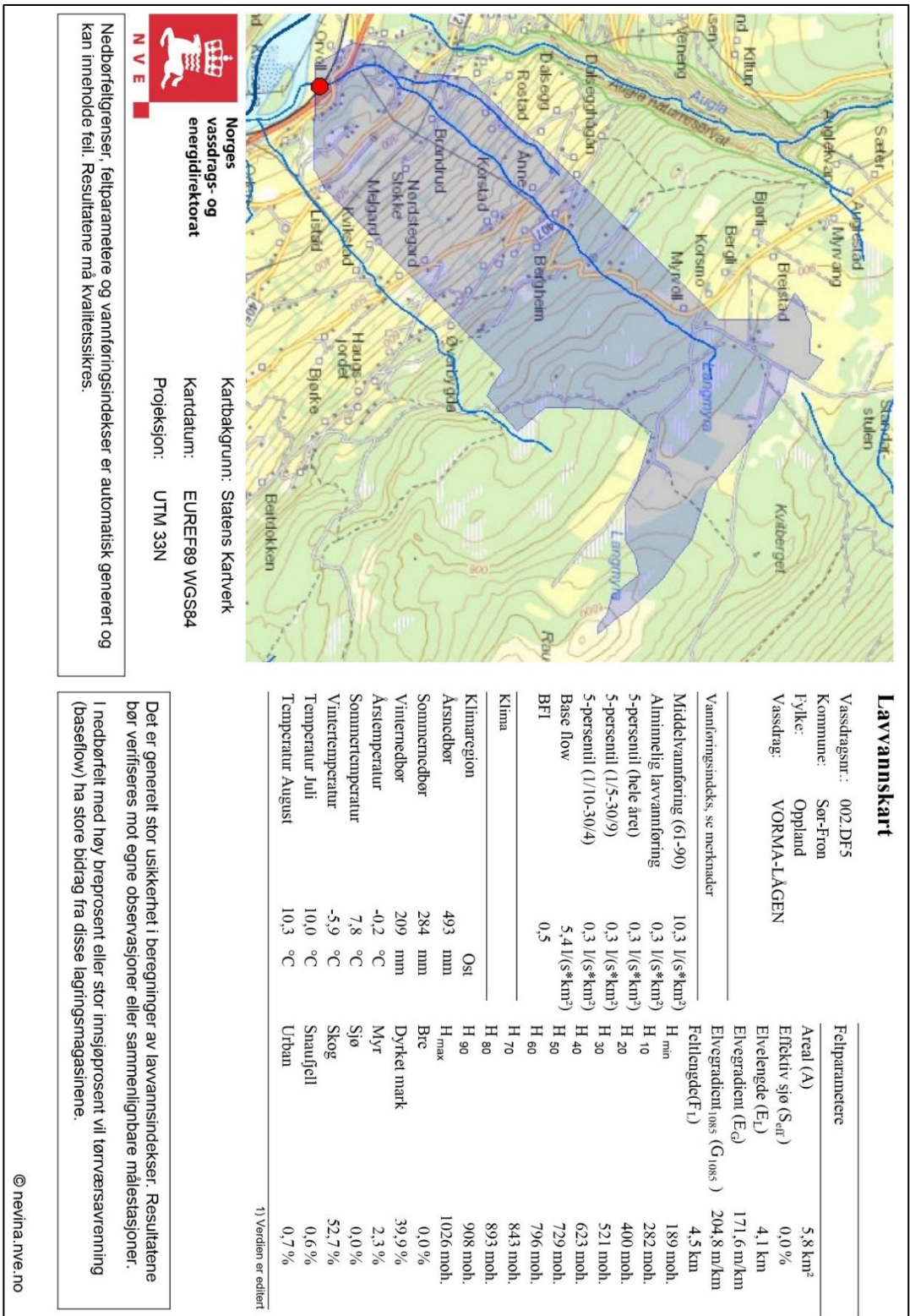
VORMA-LÅGEN	
Areal (km <sup>2</sup> )	3,34
Klimafaktor	1,4

Flomfrekvensfaktorer	Q <sup>VI</sup>		Q <sup>5</sup>	Q <sup>10</sup>	Q <sup>20</sup>	Q <sup>50</sup>	Q <sup>100</sup>	Q <sup>200</sup>
	m <sup>3</sup> /s	l/(s*km <sup>2</sup> )						
95% intervall øvre grense (m <sup>3</sup> /s)	1,9	572,3	2,5	3,1	3,7	4,6	5,5	6,4
Flomverdier (m <sup>3</sup> /s)	1,1	323	1,4	1,7	1,9	2,4	2,8	3,2
95% intervall nedre grense (m <sup>3</sup> /s)	0,6	183	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6
Flommer med klimapåslag (m <sup>3</sup> /s)	1,5	452,7	1,4	2,3	2,7	3,3	3,9	4,5

Beregningene er automatisk generert og kan inneholde feil. Det er generert stor usikkerhet i denne typen beregninger. Resultatene må verifiseres mot egne observasjoner eller sammenlignbare målestasjoner. Resultatene er ikke gyldig som grunnlag til flomberegninger for klassifiserte dammer.

# Vedlegg E - Rapport fra NEVINA 2

Vedlegg E: Rapporten produsert gjennom NEVINA for hele nedbørsfeltet. Flomverdiene med klimapåslag ligger ikke langt unna de ekstreme vannføringerne beregnet i steady flow-modelleringen.



# Flomberegning

Vassdragsnr.: 002.DF5

Kommune: Sør-Fron

Fylke: Oppland

Vassdrag: VORMA-LÅGEN

Flomverdiene viser størrelsen på kulminasjonsflommer for ulike gjentakelsesintervall. De er beregnet ved bruk av et formehverk som er utarbeidet for nebbørfelt under ca 50 km<sup>2</sup>. Feltparametere som inngår i formehverket er areal, effektiv sjøprosent og normalavrenning (l/s\*km<sup>2</sup>). For mer utdypende beskrivelse av formehverket henvises det til NYE – Rapport 7/2015 «Veileder for flomberegninger i små uregulerte felt». Det pågår fortsatt forskning for å regulere felt». Det pågår fortsatt forskning for å

Det pågår fortsatt forskning for å bestemme klimapåslag for momentanflommer i små nebbørfelt. Frem til resultatene fra disse prosjektene foreligger anbefales et klimapåslag på 1,2 for døgnmiddelflom og 1,4 for kulminasjonsflom i små nebbørfelt.

## VORMA-LÅGEN

Areal (km <sup>2</sup> )	5,75
Klimafaktor	1,4

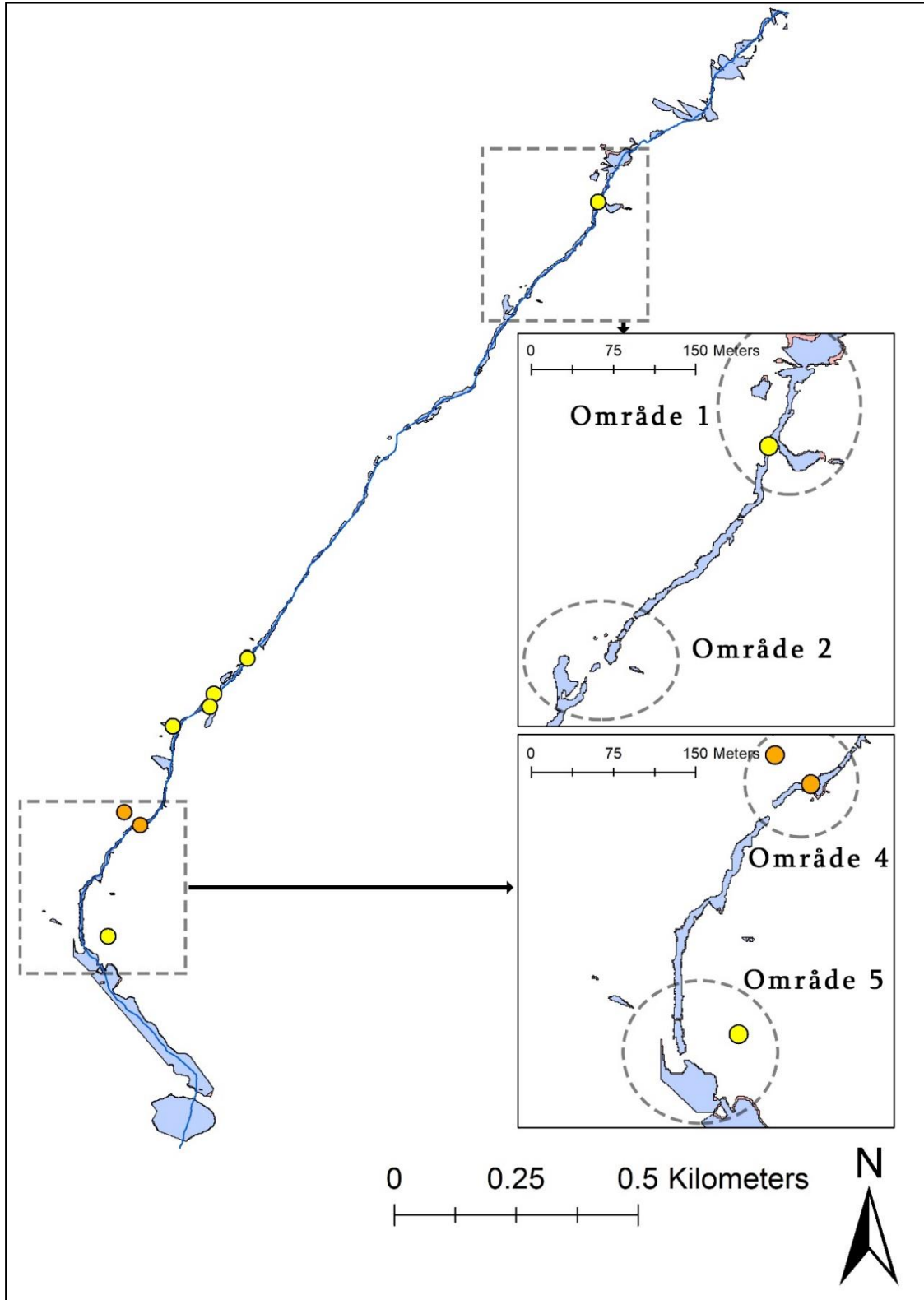
	Q <sup>VI</sup>		Q <sub>5</sub>	Q <sub>10</sub>	Q <sub>20</sub>	Q <sub>50</sub>	Q <sub>100</sub>	Q <sub>200</sub>
	m <sup>3</sup> /s	l/(s*km <sup>2</sup> )						
Flomfrekvensfaktorer	-	-	1,28	1,54	1,82	2,23	2,58	2,99
95% intervall øvre grense (m <sup>3</sup> /s)	2,8	489,4	3,7	4,5	5,5	6,9	8,2	9,5
Flomverdier (m <sup>3</sup> /s)	1,6	277	2,0	2,5	2,9	3,5	4,1	4,8
95% intervall nedre grense (m <sup>3</sup> /s)	0,9	156	1,1	1,3	1,5	1,8	2,1	2,4
Flommer med klimapåslag (m <sup>3</sup> /s)	2,2	387,1	2,0	3,4	4,0	5,0	5,8	6,7

Beregningene er automatisk generert og kan inneholde feil. Det er generelt stor usikkerhet i denne typen beregninger. Resultatene må verifiseres mot egne observasjoner eller sammenlignbare målestasjoner. Resultatene er ikke gyldig som grunnlag til flomberegninger for klassifiserte dammer.



# Vedlegg F - Sammenligning av 2,8 og 4 m<sup>3</sup>/s

Vedlegg F: Flomsoneskart ved 2,8 m<sup>3</sup>/s i blått lagt på 4 m<sup>3</sup>/s i rødt. Område 1, 2, 4 og 5 er fremhevet.



# Vedlegg G - Sammenligning med og uten blokkering

Vedlegg G: Flomsonekart ved 2,8 m<sup>3</sup>/s uten blokkerte stikkrenner i blått lagt oppå blokkerte stikkrenner i rødt.

