

NORGES TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE
UNIVERSITET

MASTEROPPGAVE

**Flomvei og aktsomhetskartlegging ved
bruk av GIS over nedbørsfeltet
Brandrudsåa i Gudbrandsdalen.**

Forfatter:

Ida Marie HENNIG

Veileder:

Ivar BERTHLING

10. mai 2015

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Sammendrag

Fakultet for samfunnsvitenskap og teknologiledelse

Geografisk institutt

Master i Geografi

Flomvei og aktsomhetskartlegging ved bruk av GIS over nedbørsfeltet Brandrudsåa i Gudbrandsdalen.

by Ida Marie HENNIG

En av de største utfordringene for å ivareta en robust og trygg infrastruktur er flom og vann på avveie. Som følge av økte klimagassutslipp grunnet menneskelig aktivitet, og naturlige årsaker, er det utarbeidet ulike scenarier for temperaturøkning i fremtiden. På bakgrunn av dette vil man i tillegg til økt temperatur kunne forvente en økt hyppighet av store nedbørsmengder i fremtidens Norge. Flommen i Gudbrandsdalen i 2013 førte til store skader i distriktet. Den utløsende årsaken til dette var intens nedbør. Sidevassdragene til Gudbrandsdalslågen førte til overraskende store skader på eiendom, bygninger og infrastruktur. Små vassdrag med bratt gradient har en rask respons til styrtregn, og kommer det på avveie har vannet stor erosjonskraft. Ved en styrtflom kan vannet oppnå høy hastighet. Vannets evne til å grave og flytte masser, samt utløse flom- og jordskred utgjør en stor fare for infrastruktur, samfunn og potensielt menneskeliv.

I denne masteroppgaven ble det benyttet Geografisk Informasjonssystem (GIS) for å modellere flombekker ved bruk av to ulike flyt algoritmer. I tillegg ble det utarbeidet et aktsomhetskart for flom- og jordskred ved bruk av Fuzzy logic overlagsanalyse. Ved analyse av flombekker i studieområdet ble det benyttet en LiDAR avledet digital terrengmodell (DEM) for å identifisere utsatte områder. Det ble indentifisert 4 områder som kan være kritiske med tanke på drenering og vann på avveie. Resultatet fra oppgaven viser at ulike algoritmer kan benyttes til dette formålet. Blandt algoritmene som ble utprøvd ble det funnet forskjell i grad av nøyaktighet, og det ble gjort en vurdering på hvilken av disse som kan være mer hensiktsmessig for studieområdet. I deler av områdene som ble undersøkt gir en av algoritmene (D-Infinity) et mer nøyaktig bilde. D-Infinity modellerer divergerende strømning, noe som kan resultere i et mer differensiert resultat der vannet kan ta flere retninger. Resultatet fra aktsomhetskartet peker på områder, der utvalgte parametre tilsier at det kan utløses flom- og jordskred i Brandrudsåa.

Summary

One of the biggest challenges to ensure a robust and secure infrastructure is flood and water gone astray. As a result of increased greenhouse gas emissions due to human activities and natural causes, various scenarios for temperature increase in the future has been predicted. In addition to increased temperatures, a change in climate is likely to increase the frequency of heavy precipitation in the future Norway. The floods in Gudbrandsdalen in 2013 led to major damage in the district. The triggering factor for this was intense rainfall. Small watersheds led to surprisingly large damage to property, buildings and infrastructure. Small rivers with steep gradient has a rapid response to heavy precipitation, and if it comes astray water has high erosion forces. In a flood event water can achieve high speed. Water's ability to dig and move earth, and triggering floods and landslides pose a great danger for infrastructure, communities and potentially lives.

In this thesis Geographical Information System (GIS) was used to model flood streams using two different flow algorithms. In addition, it developed a susceptibility map for debris flows and landslides using Fuzzy logic overlay analysis. When analyzing flood streams in the study area a LiDAR derived digital terrain model (DEM) was used to identify vulnerable areas. Four areas that may be critical in terms of drainage and water astray were identified. The results of the study show that different algorithms can be used for this purpose. Among the algorithms that were tested, it was found difference in the degree of accuracy, and it was made an assessment of which of these that may be more appropriate for the study area. In parts of the areas surveyed one of the algorithms (D-Infinity) provided a more accurate picture. D-Infinity model divergent flow, which can result in a more differentiated result where the water can take several directions. The result of the susceptibility map point to areas where selected parameters indicates that it can be triggered debris flows and landslides in Brandrudsåa.

Forord

Masteroppgaven er avslutningen som markerer at fem år som student ved Geografisk Institutt ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) er over. Årene har vært svært lærerike, jeg vil særlig trekke frem gode forelesninger og spennende feltkurs. Å arbeide med masteroppgaven har vært utfordrende, men mest av alt har det vært givende å arbeide med en problemstilling jeg synes er viktig og svært aktuell.

Jeg vil først og fremst rette en stort takk til min veileder, førsteamanuensis ved Geografisk institutt Ivar Berthling, for en utmerket veiledning det siste året. Takken rettes ikke bare mot veiledning med masteroppgaven, men jeg vil også takke deg for at du har formidlet kunnskapen din på en fantastisk måte i løpet av studietiden min.

Jeg vil takke Jernbaneverket (JBV) og NIFS-prosjektet for muligheten for å studere et så spennende tema som flom og vann på avveie. Det var lærerik å få delta på feltbefaringer med Steinar Myrabø (JBV) i forbindelse med masteroppgaven. Per Lars Erik Virhen (JBV) har bidratt med sin kunnskap om GIS og flomveianalyser og hjelpen har vært helt unnværlig. Takk for at du delte dataene dine med meg og at du var tilgjengelig for små og store spørsmål underveis.

Mine gode studievenner fortjener også en stor takk. Sist, men ikke minst, vil jeg rette en stor takk til Ole Jacob. Takk for at du har støttet meg på best mulig måte igjennom alle årene som student.

Innhold

Sammendrag	i
Summary	ii
Forord	iii
Innhold	iv
Figurliste	vii
Tabeller	xii
Forkortelser	xiii
1 Innledning	1
1.1 Oppgavens relevans og samfunnsnytte	2
1.1.1 Små, bratte vassdrag	4
1.2 GIS, Geomorfometri og terrengmodeller	5
1.2.1 Tidligere studier	6
1.3 Problemstilling	7
2 Områdebeskrivelse	8
2.1 Brandrudsåa	8
2.1.1 Berggrunnsgeologi	10
2.1.2 Kwartærgeologi	11
2.1.3 Klima	12
2.1.3.1 Klima mot 2100	12
3 Teori	15
3.1 Lidar	15
3.1.1 Nøyaktighet	17
3.1.2 Filtrering	17
3.2 Digital terrengmodell	18
3.3 Hydrologiske analyser	21
3.4 Aktsomhetskart for skred	23
3.5 <i>Fuzzy logic</i>	26
3.5.1 Topografiske parametre	28

3.5.1.1	Helning	28
3.5.1.2	Kurvatur	29
3.5.1.3	<i>Topographic wetness index</i>	31
3.5.2	Miljøbestemte parametre	31
3.5.2.1	Arealbruk	32
3.5.3	Geologiske parametre	33
3.5.3.1	Løsmasse	33
3.5.3.2	Berggrunn	33
3.5.4	Overlagsfunksjon i <i>Fuzzy logic</i>	33
4	Metode	36
4.1	Metode	36
4.1.1	Datainnsamling	36
4.1.2	LiDAR og LAS-filer	37
4.1.2.1	Oppløsning	38
4.1.3	Generering av DEM	38
4.1.3.1	LAS til Raster	39
4.1.3.2	LAS via <i>Terrain</i> til Raster	39
4.1.4	<i>Root Mean Square Error</i>	40
4.1.5	Modifisering av DEM for modellering av flomveier og TWI	41
4.1.5.1	Manipulering av DEM	41
4.1.5.2	<i>Fill</i>	43
4.1.6	Flytalgoritmer	43
4.1.6.1	<i>D8</i>	44
4.1.6.2	<i>D-infinity</i>	45
4.1.7	<i>Topographic wetness index</i>	47
4.1.8	<i>Fuzzy Logic</i>	47
4.1.8.1	Databehandling	48
4.1.8.2	Medlemskapverdi for parametre	49
4.1.8.3	Fuzzy overlagsanalyse	50
5	Resultater	52
5.1	Resultater	52
5.1.1	Valg av DEM	52
5.1.2	Modellering av flomveier	54
5.1.2.1	Algoritmer	54
5.1.2.2	TWI	56
5.1.2.3	Validering	58
5.1.2.4	Sårbare områder og infrastruktur	59
5.1.3	<i>Fuzzy logic</i>	64
5.1.3.1	Valg av parametre og submodeller	64
5.1.3.2	Områder i Brandrudsåa som potensielt er utsatt for flom- og jordskred	65
6	Diskusjon	69
6.1	Digital terrengmodell	69
6.1.1	RMSE	69

6.2	Modellering av flomveier og identifisering av sårbareområder	71
6.2.1	Modifisering av DEM	71
6.2.2	Sårbare områder	73
6.2.3	Sammenlikning av <i>D8</i> og <i>D-Infinity</i>	74
6.2.4	TWI	77
6.3	Aktsomhetskart	78
6.3.1	Valg av parametre og databehandling	78
6.3.1.1	Aktsomhetskart	82
6.3.1.2	Validering av flom- og jordskred analysen	84
6.4	Forslag til videre arbeid	85
6.5	Avslutning	85
A	Fuzzy Logic	95
B	Aktsomhetskart	103

Figurer

2.1	Kart over arealbruk i Brandrudsåa (Norsk Institutt for skog og landskap 2015)	9
2.2	Berggrunnsgeologien i Brandrudsåa (NGU 2008)	10
2.3	Løsmassekart over Brandrudsåa (NGU 2015)	11
2.4	Middelnedbørkart over Norge (MET 2015)	13
3.1	Figuren viser hvordan flybåren laserskanning systemet er oppbygd. I flyet er GPS-mottaker, IMU og laserskanneren plassert Gallay [2013].	16
3.2	Figuren viser hvordan flybåren laserskanning kan registrere flere retur-signaler (echoes). Diskret laserskannerer kan motta flere signaler, men utviklingen av full waveform forbedrer kartleggingen i vegeterte områder Gallay [2013]	17
3.3	Figur som beskriver arbeidsflyt ved generering av en terrengmodell Wilson [2012a]	19
3.4	Figur som viser sammenhengen mellom innsamling av data og tolkning av DEM	20
3.5	Fremstilling som beskriver effekten oppløsningen har på representasjonen av topografien Hengl and Evans [2009]	21
3.6	Figur som viser tre grunnleggende kurver for å beskrive fuzzy medlemskapfunksjon (a) klokkeform (b) Z-form (c) S-form Zhu et al. [2014]	27
3.7	Kart som viser helningen i Brandrudsåa generert av DEM. Gjennomsnittlig helning er 12° . Nedbørfeltet har et flatere området øverst i feltet, men en brattere helning i den midtre delen. Røde områder markerer de bratteste områdene og er i hovedsak fluviale nedskjæringer og raviner.	29
3.8	Kart som viser kurvaturen i Brandrudsåa generert fra DEM. Røde celler viser en konveks kurvatur og blå celler viser en konkav kurvatur. Beige celler er flate områder.	30
3.9	(a) Figuren viser hvordan plan kurvaturen beskriver kurvaturen i horisontal retning. Rød farge viser en konkav kurvatur og grønt viser en konveks kurvatur (b) Figuren viser hvordan profil-kurvaturen beskriver profilet til skråningen. Med rødt illustreres det at skråningen er konveks og grønt beskriver at skråningen er konkav i det vertikale planet.	31
4.1	Figur som viser hvordan LAS dataset er oppbygd. Til venstre er LAS-filene lagret på hardisken og utsnittet viser hvordan LAS-dataset fremstår i ArcMap ESRI [2013]	37
4.2	Modell som beskriver arbeidsflyten fra LAS-filer til DEM.	39
4.3	Modell som beskriver en forenklet arbeidsflyt fra LAS-filer og FKB-data til <i>Terrain</i>	39

4.4	Modell som beskriver arbeidsflyten ved å heve bygninger og senke stikkrenner.	41
4.5	Modell som beskriver arbeidsflyten modifisere opprinnelig DEM.	42
4.6	Modifisering av DEM	42
4.7	Hillshade av to versjoner av samme DEM	43
4.8	Figur som viser hvordan verktøyet ”Fillfungerer.” Fillfjerner gropen i ved å tildele gropen veriden til cellen nedstrøms ESRI [2014].	43
4.9	Figur som visualiserer hvordan D8 algoritmen avgjør hvilken strømningsretning cellen oppnår ESRI [2014]	44
4.10	Figur som viser hvordan vanntilførende område blir kalkulert fra strømningsretningen ESRI [2014]	45
4.11	Figur som vier hvordan D-infinity baserer seg på den bratteste flaten på en triangulær flate Tarboton [1997]	46
4.12	Modell som beskriver samlet arbeidsflyt ved å modellerer flomveier med åpne og lukkede stikkrenner.	46
4.13	Modell som viser samtlige parametrene som ble utprøvd. Berggrunn og TWI avledet fra D-INF ble ikke en del av resultatet.	49
4.14	Submodell som viser plan- og profil-kurvatur sammenslått med medlemskapfunksjonen Fuzzy OR. Resultatet er et raster med høye medlemskapsverdier der som et av parametrene har høy medlemskapsverdi.	50
4.15	Modell som viser løsmasse og arealbruk som submodell. Fuzzy AND ble anvendt for å identifisere celler som har høy medlemskapsverdi i både arealbruk og løsmasse. Resultatet er en submodell med høy medlemskapsverdi dersom begge kartlagene har det.	51
4.16	Modeller som viser hvordan aktsomhetskartet ble generert. Helning og TWI ble vurdert som parametre som skal innvirke alene. Kurvatur og Løsmasse og arealbruk ble implementert. Medlemskapfunksjonen som avgjorde verdiene til cellene i resultatet ble avgjort med Fuzzy GAMMA $\lambda(0.9)$	51
5.1	Kart som viser punktene som RMSE er regnet ut fra. Lyseblå punkter er punktene fra som inneholder høydeverdier, grønne punkter er ikke anvendt i RMSE da de ikke inneholder informasjon om høyde. Kartet viser at punktene er spred over hele modellen, men er i forbindelse med fylkesveiene og E6.	53
5.2	Kart som viser D-INF algoritmen i Brandrudsåa	55
5.3	Kart som viser D-infinty algoritmen ved blokkerte stikkrenner. Legg merke til hvordan vannet kan drenere til flere celler noe som viser at vannet sprer seg rundt en høyde.	56
5.4	TWI generert fra D8 algoritmen.	57
5.5	TWI generert fra D-Infinity	57
5.6	Histogram som vier spredningen på verdiene i TWI rasterene. (A) D8 algoritmen resulterer i en TWI som har gjennomsnittsverdi 9,24 og standardavviket er 2,78. (B) D-Infinity algoritmen resulterer i en TWI som har lavere gjennomsnittsverdi enn D8,4,83. Standardavviket er lavere med 1,72 (skjerm bilde fra ArcMap)	58

- 5.7 Kart som viser at eksisterende elv og vanntilførende område (Flow accumulation) sammenfaller både for *D8* og *D-Infinity*. Dette kan være en god indikator på at metoden modellerer flomveier som representerer virkeligheten. 59
- 5.8 Sammenlikning av *D-Infinity* og *D8* algoritmen i område 1, Kvarvvegen. Terskelverdi for akkumulering er satt til 3000 celler i begge fremstillingene. Lilla strøm viser hvordan vannet ville ha drenert dersom stikkrennen (der det blå vannet renner igjennom) hadde vært helt blokkert. Noe som kunne ha ført til skadepunktet (kraftig erosjon i grøften). Begge metodene klarer å vise hvordan den øverste stikkrennen kan være et kritisk punkt. 60
- 5.9 Sammenlikning av *D-Infinity* og *D8* algoritmen i område 2, Dalseggvegen. Terskelverdi for akkumulering er satt til 3000 celler i begge fremstillingene. Kartet viser at det er svært viktig å ha tilstrekkelig dimensjonering i den naturlige vannveien, da en blokkering av disse kan føre store vannmasser på avveie. flomvei analysene viser at vann på avveie kan ha ført til registrert skadepunkt. 61
- 5.10 Ortofoto som bekrefter akkumulering av vann på jorde i område 2. Svart pil viser tegn på erosjon som kan være relatert til vann på avveie. Bilde er tatt 07.06.2013 (GEOVEKST) 61
- 5.11 Sammenlikning av *D-Infinity* og *D8* algoritmen i området 3, Ysterivegen. Terskelverdi for akkumulering er satt til 3000 celler i begge fremstillingene. Det fremkommer av begge metodene at vannet (lilla strøm) kunne ha forårsaket det første skadepunktet. Dette ved at vannet har drenert gjennom den øverste stikkrenna 62
- 5.12 Ortofoto som viser store skader i område 3. Gul stjerne viser samme skadepunkt (ved bekken) i kartet over område (3). Bilde er tatt 25.05.2013 (GEOVEKST) 63
- 5.13 Sammenlikning av *D-Infinity* og *D8* algoritmen i område 4, Midtre Kvarvvegen. Terskelverdi for akkumulering er satt til 3000 celler i begge fremstillingene. Øverste skadepunkt modellerer *D-Infinity* algoritmen at vannet drenerer over veien. *D8* algoritmen modellerer at vannet kun drenerer på vestsiden av veien. 63
- 5.14 Kart som viser medlemskapverdiene til submodellen kurvatur utarbeidet med medlemskapfunksjonen Fuzzy AND. Lyse celler representerer områder som har høy medlemskapverdi. Kartet viser at det oppstår i skråninger som er konvekse og raviner/forsenkinger. Flate områder er representert ved svarte celler og viser områder som det ikke er knyttet til fare for utløsning av skred. 64
- 5.15 Kart som viser medlemskapverdiene til submodell løsmasse og arealbruk utarbeidet med medlemskapfunksjon Fuzzy OR. I kartet er celler som er representert med hvitt områder som har høy medlemskapverdi i begge kartlagene. Det innebærer at det må være en løsmasse kategori og arealbruk som tilsier at området er potensielt utsatt for utløsningen av flom- og jordskred. I kartet ser en at områder som er kartlagt med bart fjell og skog har blitt tildelt lave medlemskapverdier. Andre områder som har lav medlemskapverdi er morene med liten mektighet, myr, bebyggelse, vann og skog. Høyest medlemskapverdi har områder som har morene med stor mektighet og jordbruk. Områder representeres i kartet med hvite celler. 65

5.16	Aktsomhetskart som viser med rødt områder som er utsatt for skred ut i fra parametre som helning, kurvatur, TWI, løsmasse og arealbruk. Kartet har blitt til ved bruk av <i>Fuzzy logic</i> som metode og $\lambda(0.9)$ som medlemskapsfunksjon. I kartet kommer det frem at områder som potensielt kan utløse skred er hovedsaklig lokalisert midt i feltet og ved ravinene nede i Brandrudsåa.	66
5.17	Aktsomhetskart som viser med rødt områder som er utsatt for skred ut i fra parametre som helning, kurvatur, TWI, løsmasse og arealbruk. Kartet har blitt til ved bruk av <i>Fuzzy logic</i> som metode og denne fremstillingen har $\lambda 0.9$ som medlemskapsfunksjon. I kartet kommer det frem at områder som potensielt kan utløse skred er lokalisert midt i feltet og ved ravinene nede i Brandrudsåa.	67
5.18	Aktsomhetskart som viser med røde polygoner NVEs potensielle områder for utløsningen av skred vist med rødt. Svarte polygoner viser skadeområder fra flommen 2013. Kartlagene er lagt over resultatet fra <i>Fuzzy logic</i> overslaganalyse.	68
A.1	I helningsrasteret indikerer hvite celler høy medlemskapsverdi. Områder som har høyere helning enn gjennomsnitts helningen (11.88 grader) har større sansynlighet for å bli medlem. Flate områder har fått medlemskapsverdien 0. Kartet viser at der bekkene har erodert ned i løsmassene har høyest medlemskapsverdi.	95
A.2	I rasteret som viser medlemskapsverdien til plan-kurvaturen er positive verdier tildelt høy medlemskapsverdi. Konkave celler som indikerer en nedsekning (dal/ravine)er representert med hvite celler.	96
A.3	Profil-kurvatur rasteret viser med hvite celler som er konvekse i helningsretningen. De hvite cellene indikerer at området er mer potensielt utsatt for skred og har en høy medlemskapsverdi	97
A.4	Rasteret som beskriver medlemskapsverdien til TWI avledet fra D8 algoritmen gir høy medlemskapsverdi til celler som akkumulerer vann. Områder med bekk og flate områder har fått høy medlemskapsverdi	98
A.5	Medlemskapsverdi for TWI rasteret avledet fra D-infinity algoritmen. Rasteret skiller seg fra TWI avledet fra D8 ved at flate områder har fått høyere medlemskapsverdi.	99
A.6	Rasteret over arealbruk har høy medlemskapsverdi på jordbruk og snau-mark. Område med skog, myr, vann og bebyggelse har fått lav medlemskapsverdi.	100
A.7	Medlemskapsverdiene for løsmassene er gitt på grunnlag av tidligere registrerte skred. Løsmassene med høyest medlemskapsverdi er morene materiale med tykt dekke.	101
A.8	For berggrunnen er det fylltittisk sandstein som har høyest medlemskapsverdi. Lavest medlemskapsverdi er berggrunn med innslag av skifer.	102
B.1	Kart over Brandrudsåas potensielle aktsomhetsområder med bruk av Fuzzy OR. En celle må ha høy medlemskapsverdi i samtlige kartlagene i for å oppnå høy aktsomhetsverdi i resultatet.	103
B.2	Kart over Brandrudsåas aktsomhetsområder med bruk av Fuzzy AND. En celle kan ha høy medlemskapsverdi i kun ett av kartlagene i modellen for å oppnå høy verdi i resultatet.	104

B.3	Kart over Brandrudsåas aktsomhets områder med bruk av Fuzzy AND. Ved medlemskapfunksjonen må en celle ha høy medlemskapverdi i et av inndata for å oppnå høy verdi i resultatet.	105
B.4	Kart over Brandrudsåas aktsomhets områder med bruk av Fuzzy AND. Ved medlemskapfunksjonen må en celle ha høy medlemskapverdi i et av inndata for å oppnå høy verdi i resultatet.	106

Tabeller

4.1	Tabell som viser antall skred. Verdiene er sammenslått av skredtypene utglidning, jordskred, flomskred og uspesifiserte skred i Gudbrandsdalen og Ottadalen Walberg and Devoli [2014]	48
5.1	Tabellen viser gjennomsnittlig avvik fra målte terrengdata \pm SD, og RMSE for 14 terrengmodeller. Utgangspunktet for alle modellen er det samme LAS-dataset. Laveste RMSE ble funnet for metoden Maximum (uten modifisering) av stikkrenne (2.051 m).	53

Forkortelser

ArcMap	Programvare for Geografisk informasjons behandling
DBS	Direktoratet for S ikkerhet og B eredskap
DEM	D igital E levation M odel
D8	D irection 8 eighth flow
DINF	D irection IN FINITY flow
ESRI	E nvironmental S ystem R esearch I nstitute
FKB	F elles K artdata B ase
GIS	G eografisk I nformasjons S ystem
GNSS	G lobal N avigation S atellite S ystem
GPS	G lobal P ositioning S ystem
IDW	I nverse D istance W eighting
IMU	I nertial M easurement U nit
JBV	J ern B ane V erket
LAS	L og A SCII S tandard F ile format
LiDAR	L ight D etection A nd R anging
N50	N orge 50 G runnlagsdata
NIFS	N aturfare I nfrastruktur F lom S ked
NGU	N orges G eologiske U ndersøkelse
NN	N atural N eighbour
NVE	N oregs V assdrag- og E nergidirektorat
MET	M ETeorologisk institutt
SVV	S atens V eg V esen
TauDEM	T errain analysis using D igital T errain M odels
TWI	T opographic W etness I ndex
RMSE	R oot M ean S quare E rror

UTM	Universal Transverse Mercator
WGS84	World Geodetic System 1984

Kapittel 1

Innledning

I mai 2013 ble Gudbrandsdalen nok en gang utsatt for flom. Våren og vinteren hadde vært forholdsvis kald og tørr og det var målt mindre snø enn normalt Østafjells. Da temperaturene begynte å stige, akselererte snøsmeltingen i høyden og sammen med et kraftige regnvær ble konsekvensene store i dalføret. Kun få år tidligere hadde Pinseflommen (2011) rammet Gudbrandsdalen hardt og flere steder var skadene fortsatt ikke gjenopprettet. Data fra meteorologisk institutt (MET) og Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) estimerte flommen i 2013 som en 50 års returperiode i Gudbrandsdalslågen, men for sidevassdragene ble det estimert 10-20 års-flom. Nedbøren som forårsaket flommen var kraftig, men trolig ikke ekstrem.

Den utløsende årsaken til flommen i 2013 var nedbør kombinert med snøsmelting, men det er flere faktorer som påvirker omfanget til flommen. En medvirkende årsak til flommen i 2013 var en lengre periode med temperaturer ned til minus 20 tidligere på vinteren. Dette hadde ført til gjennfryste stikkrenner og dreneringsveier i området. Nedbør og smeltevann hadde tidligere ført til perioder med utvasking og graving. Den gjenværende telen i dalsidene førte til økt avrenning og kortere responstid for sidevassdragene i Gudbrandsdalen [Sellevold and Edvardsen \[2013\]](#).

En av de største utfordringene for en robust og trygg infrastruktur er flom og vann på avveie [NIFS \[2015\]](#). Det er blitt registrert vannrelaterte skader på infrastruktur for store summer i Gudbrandsdalen de siste årene, og med fremtidens klimafremskrivninger

må Norge forberede seg på flere liknende hendelser. En velkjent metafor er et *varmere, våtere og villere vær*, men flommen i 2013 viser at det er ikke kun de ekstreme hendelsene som fører til store konsekvenser.

Under flommen i 2013 var skadene på kun veinettet i Brandrudsåa taksert til 1 475 000 (tall fra Statens Vegvesen) og flommen kostet distriktet rundt en halv milliard kroner. Jernbanenettet ble også hardt rammet av flommen. Det er anslått at det vil koste opp til 300 millioner kroner for å gjenopprette skadene. Mellom Lillehammer og Dombås var det 200 punkter som hadde behov for tiltak etter flommen og 50 av disse var akutte. Mange av områdene som var skadet besto av gammel underbygging og med svak eller ikke tilstrekkelig dremskapasitet. Vann på avveie på grunn av høy sedimenttransport og tilstoppede vannveier er trukket frem en av grunnene til de store ødeleggelsene [DBS \[2013\]](#)

1.1 Oppgavens relevans og samfunnsnytte

Samfunnet er avhengig av en velfungerende transportinfrastruktur. Den desentraliserte befolkningsstrukturen i Norge gjør transportnettet viktig for nød- og beredskapstjenester, næringsliv og innbyggernes hverdagsliv. Dagens transportsystem er i stor grad utsatt for klimarelaterte utfordringer. Intens nedbør, store temperaturendringer, flom og skred gjør det utfordrende å drifte transportnettet på en trygg og forutsigbar måte [Regjeringen \[2010\]](#).

Denne masteroppgaven utføres for Jernbaneverket, og er en del av prosjektet *Naturfare Infrastruktur Flom Skred* (NIFS). NIFS er et samarbeidsprosjekt mellom ulike statlige etater og de involverte i prosjektet er Jernbaneverket (JBV), Statens Vegvesen (SVV) og Norges vassdrag- og energidirektorat (NVE). Det er i tillegg et tett samarbeid med ulike aktører som Metrologisk Institutt (MET), Statens Kartverk, universiteter og kommuner. Overordnet mål er å bygge et samfunn med trygg og robust infrastruktur, god flom- og skred varsling og trygg bebyggelse. Det er et mål å bygge en samarbeidsplattform der de ulike etatene deler sine erfaringer og kompetanse. Prosjektet har 7 delprosjekt og denne masteroppgaven skrives under delprosjekt fem, *Håndtering av flom og vann på avveie*

[NIFS \[2015\]](#).

Klimascenarier viser at de pågående klimaendringene vil føre til høyere temperaturer i Norge i fremtiden [Hanssen-Bauer et al. \[2009\]](#). Over store deler av landet vil det føre til økt middelnedbør, men også flere dager med intense nedbørperioder til alle årstider. Særlig små, bratte vassdrag mer utsatt for flom. I en av fremskrivningene kan vi forvente 10-30% økning på 50-års flomhendelser i nedbørfeltene i Gudbrandsdalen [Lawrence and Hisdal \[2011\]](#). Klimaendringer med hyppigere og mer ekstreme værforhold vil forsterke dagens utfordringer, men det er også en stor sannsynlighet for at det oppstår nye problemer. Jord og snøskred vil ha en økt fare og vil kunne ramme områder som tidligere ikke er utsatt .

Utbygde områder kan uavhengig av klimaendringer ha en økning av flomproblematikk som følge av de menneskelige inngrep som hele tiden gjøres i naturen. NIFS-prosjektet har bidratt til økt kunnskap på tvers av fagområder og har igjennom feltbefaringer kommet frem til at den utløsende årsaken til skred og flomhendelsene ikke nødvendigvis ligger i området til eier av infrastruktur, men at det ofte er en akkumulering av feilgrep oppstrøms i nedbørfeltet. Det krever en helhetlig tankegang da inngrep som avskoging, grøfting/drenering, jordbruk og skogsbilveier påvirker avrenningen på overflaten. I tillegg er manglende kunnskap og/eller vedlikehold av ovennevnte inngrep en stor utfordring. Hovedutfordringer er å håndtere dreneringer i hele nedbørfeltet, slik at problemene ikke akkumuleres nedstrøms. Det påpekes fra videre fra DSB at vannproblematikk bør å få høy prioritering i en planfase av planlagte prosjekter [DBS \[2013\]](#).

I landskapet er det topografien som avgjør oppførselen til overflateavrenningen. Vann som drenerer på overflaten er i den fasen av den hydrologiske syklusen som direkte er assosiert med erosjon. Det krever effektive analyser for å kunne håndtere problemene i forkant. Analyser ved hjelp av Geografiske informasjons systemer (GIS) og digitale terrengmodeller (DEM) gjør det mulig å visualisere og analysere studieområdet ved hjelp av en modell. Utviklingen av GIS og metoder for måling av terrenget gjør modellene mer nøyaktige og med en høyere oppløsning enn tidligere. Hydrologisk modellering i små nedbørfelt (<10km) er avhengig av modeller med høy oppløsning [Murphy et al. \[2008\]](#).

1.1.1 Små, bratte vassdrag

Små vassdrag med bratt gradient har en rask respons til styrtregn, og kommer vannet på avveie har vannet stor erosjonskraft med påfølgende stort skadepotensial. Vannet kan oppnå høy hastighet og det er vannets evne til å grave og flytte masser og utløse flom- og jordskred som utgjør en stor fare for infrastruktur, samfunn og potensielt menneskeliv.

Styrtflom karakteriseres ved sin hurtige forekomst og kan være svært vanskelig å varsle i forkant. Responstiden er ofte mindre enn 6 timers [Collier \[2007\]](#). Nedbørfelt som er utsatt for styrtflom karakteriseres morfologisk ved en bratt helning. Relieffet kan fremme ortografisk nedbør og forankre konvektiv nedbør. En slik topografi fremmer hurtig konsentrasjon av avrenningen og føre til dannelsen av flomveier. Siden styrtflom resulterer fra en unik kombinasjon av meteorologiske og hydrologiske forhold er det behov for å identifisere spesifikke morfologiske karakteristikk som påvirker et områdes mottakelighet [Marchi et al. \[2010\]](#).

Skadepotensialet til sidevassdragene varierer i stor grad. Det er ikke kun vannføring som avgjør hvor stor skade vassdragene kan utføre, men også hvor stor mulighet de har til løpsendringer (vann på avveie), massetransport og utløse flom og jordskred. I den sammenhengen er det viktig å ha kunnskap om omfanget av tilgjengelige eroderbare masser og per i dag eksisterer det ikke en felles metodikk for å oppnå og kartlegge slik kunnskap [DBS \[2013\]](#). Sidevassdrag har et stort potensiale til å erodere og transportere sedimenter, men det begrenset tilgang til sedimenter i kanalen. Det betyr at under vanlige forhold er det ikke tilgjengelige sedimenter i selve elvekanalen som kan transporteres. Under en styrtflom vil en kunne overgå en tersker og dekk sjiktet kan brytes opp [Church \[2002\]](#). Det kan føre at skred utløses ned i kanalen.

Etter flommen i 2011 anbefalte Direktoratet for samfunnsikkerhet og beredskap (DBS) å styrke arbeidene med å kartlegge flom- og skredfare i sidevassdragene. DBS anser at det fortsatt er et pågående behov for å styrke akkurat denne kartleggingen. En forutsetning for å bedre kartleggingen at det utarbeides detaljerte digitale høydemodeller (DEM) for hele landet. Kartlegging bør foregå i samarbeid med myndighetsutøvere på alle nivå, i tillegg til grunneiere og private infrastructureiere. DBS mener det bør være en statlig

oppgave og kan sees på som en engangsinvestering. I tillegg til utarbeidelsen av detaljerte digitale høydemodeller (DEM) vil det å kartlegge sårbare punkter i dreinsveier og identifisere behov for utskifting av stikkrenner og oppgraderinger av avløpsnettene være viktig for samfunnets sikkerhet [DBS \[2013\]](#).

Geografiske informasjonssystemer (GIS) kan modellere parametre i nedbørfeltet som kan potensielt påvirke akkumulering av vann. Hydrologiske og hydrauliske prosesser eller strømming og volum av vann kan integreres i GIS for å identifisere områder som kan være utsatt for styrtflom. GIS som metodologi kan i denne sammenhengen integreres for å bidra til økt forståelse for beslutningstakere, bedre planlegging og formilde skadene fra intens avrenningen som følge av ekstrem nedbør [Pincott-Miller et al. \[2012\]](#).

1.2 GIS, Geomorfometri og terrengmodeller

Geomorfometri er vitenskapen om kvantitative analyser av jordens overflate [R.J. Pike and Hengl \[2009\]](#). Geomorfometri går på tvers av flere fagdisipliner og begrepet kan brukes på flere måter. I denne oppgaven blir begrepet brukt om analyser av ulike parametre og objekter i en digital terrengmodell ved bruk av Geografiske informasjonssystemer (GIS). Terreng har ulike betydninger avhengig av hvem som benytter det og brukes heretter om jordoverflaten, uten vegetasjon. Digital terrengmodell blir i oppgaven forkortet til DEM, som er en oversettelse fra engelsk (digital elevation model) og er en modell av jordoverflaten avledet fra høydedata. DEM er en raster representasjon av jordoverflaten og har høydeverdier som kan måles i hver celle i den gitte oppløsningen, overflaten sies å være kontinuerlig. Det eksisterer mange ulike metoder for å samle inn høydepunkter. I denne oppgaven er høydepunkter fra LiDAR (Light Detection and Ranging) benyttet, noe som gir høy nøyaktighet. Et stort antall punkter gjør det mulig å lage detaljerte terrengmodeller [R.J. Pike and Hengl \[2009\]](#).

Tradisjonelle metoder for å kartlegge elv- og bekkekanaler stammer fra å digitalisere identifiserbare kanaler fra flyfoto. Ved å benytte DEM vil GIS bidra til å automatisere prosessen ved hjelp av flytalgoritmer. DEM avledede bekker har den fordel at den kan identifisere bekker som ikke er synlige i et flyfoto. [Murphy et al. \[2008\]](#).

Masteroppgaven beskriver resultatene av en GIS analyse av ulike parametre i sidevassdrag til Gudbrandsdalslågen, Brandrudsåa. LiDAR derivert DEM danner grunnlaget for analyser av flomveier og vann på avveie, sårbare områder og utarbeidelsen av aktsomhetskart for Brandrudsåa. Aktsomhetskartet beskriver potensiale for utløsning av jord- og flomskred.

1.2.1 Tidligere studier

Det er utført en mengde studier ved bruk av DEM for å modellere elv- og bekkekanaler. Mange forbedringer er blitt gjort siden tema ble introdusert, særlig i sammenheng med oppløsningen til DEM og anvendelse av ulike typer flytalgoritmer [Strager et al. \[2010\]](#), [Clarke and Burnett \[2003\]](#). GIS basert modellering av styrtflom et hyppig studert tema i forskning [Youssef et al. \[2011\]](#), men modelleringen har vist seg å være komplekst [Marchi et al. \[2010\]](#). Kompleksiteten har utgangspunkt i høy romlig og temporær variasjon og et ikke-lineært forhold mellom avrenning og kausale faktorer [Pincott-Miller et al. \[2012\]](#).

Rune Bratlie ved Nedre Eiker kommune og samarbeidsprosjektet, Framtidens byer, har arbeidet med temer som hvordan urbane og tettbygde strøk skal kunne håndtere overvann ved hjelp av GIS [Bratlie \[2013\]](#), [Fremtidens-byer \[2010\]](#).

Masteroppgaver innenfor samme tema har tidligere blitt skrevet ved geografisk institutt. Masteroppgavene *Urban flom som konsekvens av klimaendringer - En GIS studie* [Stenvik \[2011\]](#) og *Water on devious way* [Virehn \[2014\]](#) har utført GIS studier av flomveier og sårbareområder. Sistnevnte oppgave beskriver metoder for å generere DEM fra LiDAR og manipulering av terrengmodeller. Metoden gir muligheter for å modellere flomveier ut i fra åpne og lukkede (tette) stikkrenner [Virehn \[2014\]](#). Arbeidet fra studien har dannet deler av grunnlaget for analysene i oppgaven.

Masteroppgaven tilfører flere aspekter ved å sammenlikne *single flow* og *multiple flow* algoritmer for å modellere flomveier i Brandrudsåa. Fra DEM er det blitt avledet topografiske parametre som helning, kurvatur og *Topographic wetness index* (TWI). Sammen

med miljøbestemte og geologiske parametre bygger dette grunnlaget for aktsomhetsanalyse av jord og flomskred. *Fuzzy logic* som overlagsanalyse er anvendt for å avdekke potensielle sårbare områder i Brandrudsåa.

1.3 Problemstilling

Hva skiller *D8* og *D-Infinity* flytalgorithmene ved generering av flomveier, og hvilken algoritme fungerer mest hensiktsmessig i analyse av sårbare områder i Brandrudsåa?

Hvilke parametre bør implementeres ved utarbeidelse av aktsomhetskart for flom- og jordskred i Brandrudsåa?

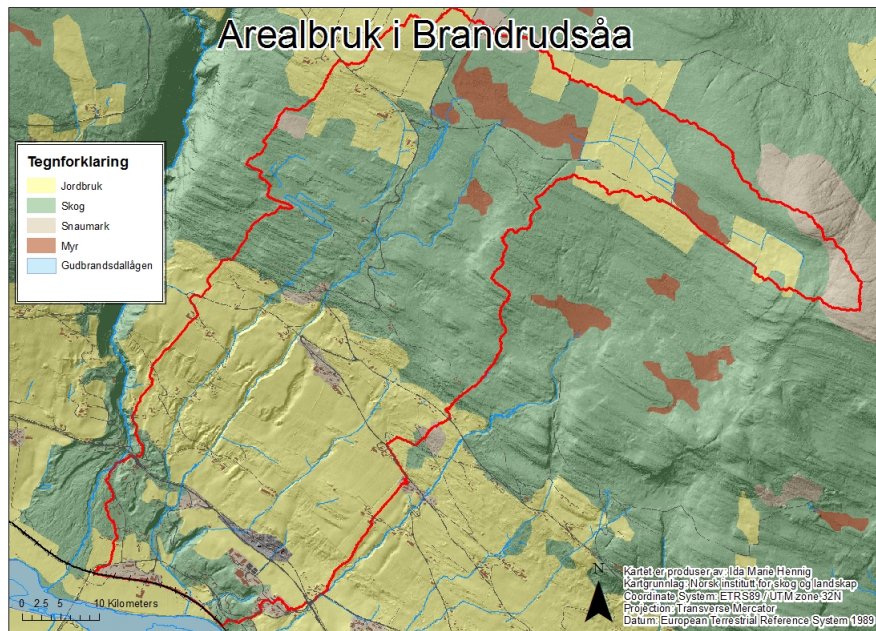
Kan *Fuzzy logic* anvendes som metode for å indentifisere områder som potensielt kan utløse skred i et lite nedbørfelt som Brandrudsåa?

Kapittel 2

Områdebeskrivelse

2.1 Brandrudsåa

Studieområde befinner seg i Gudbrandsdalen som ligger i Oppland fylke og er et av de store dalførene på Østlandet. Dalen strekker seg fra Lillehammer i sør til Lesjaskogvatnet i nord. Brandrudsåa er et lite sidevassdrag til Gudbrandsdalslågen og ligger ved Hundtorp i Sør-Fron kommune. Feltet er cirka 7 kvadratkilometer og er per NVEs definisjoner et lite nedbørfelt [Holmqvist \[2010\]](#). Studieområdet har en gjennomsnittlig helning på omtrent 12% og har høyere helning (rundt 18%) i den midtre delen av feltet. Øvre og nedre del av feltet har flate områder. Brandrudsåa starter på omtrent 880 moh og renner nedover dalsiden. Bekken har flere små tilsluttende bekker og krysser fylkesvei 407 flere ganger nedover dalsidene før den krysser E6 og Dovrebanen og har utløp i Gudbrandsdalslågen.



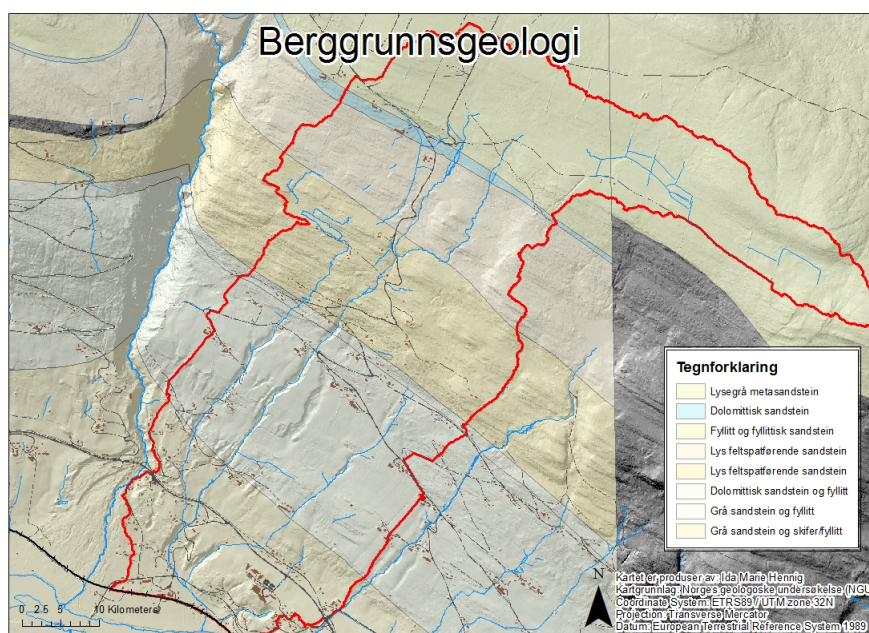
FIGUR 2.1: Kart over arealbruk i Brandrudsåa (Norsk Institutt for skog og landskap 2015)

Hvilken vei vannet naturlig tar i et terreng er bestemt av tyngdekraften. I menneskepåvirkede områder kan vannets vei kontrolleres av ulike materiale som vannet enten vil renne igjennom, under eller over. Stikkrenner, kulverter og grøfter er tiltak som skal lede vannet bort fra infrastruktur, bygninger og jordbruk. Tiltakene påvirker infiltrasjonsegenskapene til området. Brandrudsåa har 130 registrerte stikkrenner og kulverter. I tillegg antas det at det finnes et ukjent antall uregistrerte stikkrenner og dreneringssystemer for landbruk.

NIFS-prosjektets pilotområder er valgt på grunn av stort skadeomfang både på fylkesvei, E6 og Dovrebanen. Det bidrar til at de involverte aktørene har felles utbytte av å arbeide med pilotfeltene på tvers av institusjonene. Brandrudsåa er blitt valgt å jobbe videre med av NIFS-prosjektet, fordi det er et komplisert nedbørfelt å gjøre GIS-analyser i. De 130 registrerte stikkrennene fører til et høyt antall mulige kombinasjoner av åpne og lukkede stikkrenner, og fører til mange mulige flomveier når stikkrenner er tilstoppet og/eller vannet renner utenom den naturlige dreneringsveien.

2.1.1 Berggrunnsgeologi

Berggrunnsgeologien i Gudbrandsdalen er påvirket av den kaledonske fjellkjedefoldingen og sonen går fra SV-NØ igjennom Oppland. Fjellkjedefoldingen førte til et skyvedekke fra senproterozoikum som består av sandstein og skifer. Brøttumformasjonen danner berggrunnen i Gudbrandsdalen sør for Vinstra til og ned til den nordlige delen av Mjøsa. Brøttumformasjonen kan inneholde opptil 40 prosent leirskifer [Ramberg et al. \[2006\]](#). Fra berggrunnsdata fra NGU, se figur 2.2, kan en se at den øverste delen av Brandrudsåa består av fyllitt og fyllittisk sandstein. Den midtre delen består hovedsaklig av lys feltspatførende sandstein og den nederste delen består av grå sandstein og fyllitt/skifer.

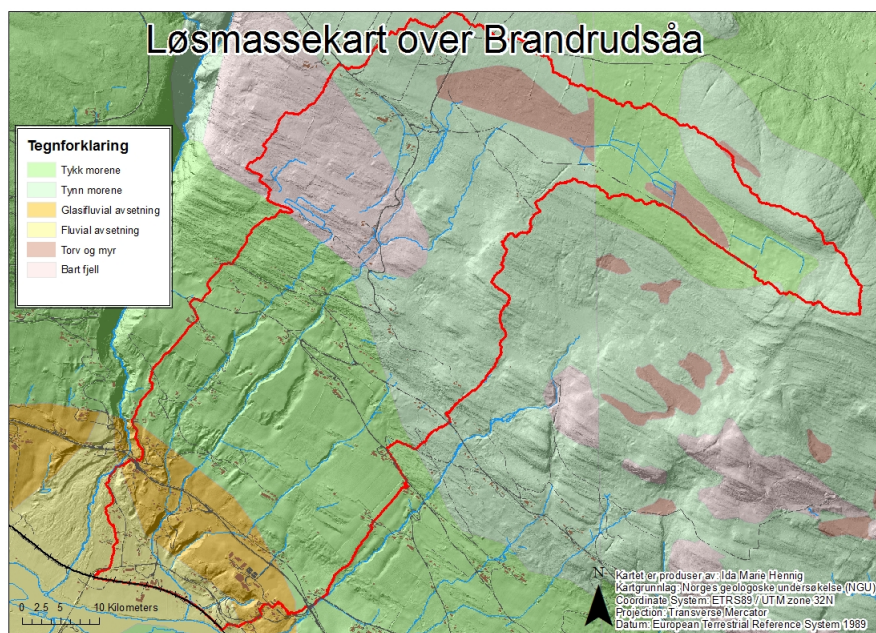


FIGUR 2.2: Berggrunnsgeologien i Brandrudsåa (NGU 2008)

Skifer og fyllitt er som bergarter som forvitrer lett. Sandstein inneholder sandkorn av kvarts. Kvarts er en av de mest motstandsdyktige mineralene og bidrar til at sandstein er en motstandsdyktig bergart. Forvitringen bidrar til dannelsen og oppbyggingen av det lokale jordsmonnet. Forvitringmateriale fra fyllitt og skifer kan inneholde leirpartikler som kan føre til at forvitring materialet mindre permeabelt [Ramberg et al. \[2006\]](#). Fyllitt er en næringsrik bergart som kan gi gode vekstvilkår [Klakegg et al. \[2008\]](#)

2.1.2 Kvartærgeologi

Kvartær er en periode av jordens historie som beskriver de siste 2.6 millioner. Perioden kjennetegnes av store sykliske variasjoner i klimaet. Under istidene (glasialer) var det kalde perioder der breen rykket frem, kalt stadialer, og i de varme periodene, kalt interstadialer, trakk breen seg tilbake. 30-40 perioder med klimaforverring av varierende lengde har blitt antydnet og innlandsisen bredde seg på sitt maksimum til Nord-tyskland. Weichsel er navnet på den siste istiden i Nord-Europa og startet for 120 000 år siden og varte til omkring 9000 år før nåtid. Yngre Dryas er navnet på de siste 1000 år av Weichsel og var en periode med klimaforverring. Gudbrandsdalen er et resultat av flere perioder med breens og smeltevannets eroderende kraft og dalen fått sin klassiske U-form [Andersen \[2000\]](#).



FIGUR 2.3: Løsmassekart over Brandrudsåa (NGU 2015)

Løsmassene i Brandrudsåa, som resten av Gudbrandsdalen, består hovedsaklig av materiale som er avsatt på slutten av siste istid eller etter siste istid. Studieområdet, se figur 2.3 er preget av områder bestående av morene med stor mektighet og områder med et mindre dekke. Morenemateriale er utsortert og det består både finmateriale som silt og leire, men kan bestå av store blokker. Sammensetningen av morenemateriale er påvirket av den lokale berggrunnen. Der grunnfjellet består av fylltitt er det ofte dekke av stor mektighet. Leirpartiklene fra forvitringen kan føre til redusert infiltrasjonskapasitet og

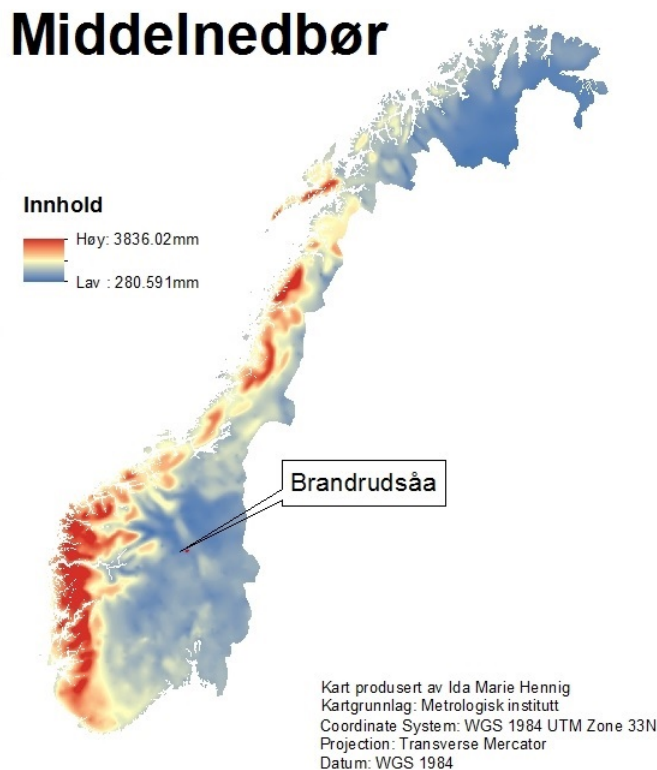
mer overflateavrenning. Berggrunn med skifer har ført til morenejord som er velegnet til jordbruk [Ramberg et al. \[2006\]](#). I dalbunn er det glasifluviale og fluviale avsetninger. Øverst i feltet er det områder med torv og myr. Det er stedvis bartfjell eller med tynt dekke av morene.

2.1.3 Klima

Hydrologiske prosesser har sammenheng med klimasystemet og avrenningen vil variere fra år til år og med en betydelig sesongvariasjoner. I Norge er avrenningen delvis knyttet til variasjoner i solinnstråling og nedbørs variasjoner. Akkumulering av snødekke i vinterhalvåret og smelting om våren eller sommeren har stor påvirkning i i områder tilknyttet fjellområder og vidder. Det er vanlig å beskrive klimatiske forhold ved normaler. Normaler er middeler verdier over en 30års periode [NVE \[2002\]](#). Klima i Gudbrandsdalen kjennetegnes ved typisk innlandsklima, med varme somre og kalde vintre. Nedbørmengden relativt lav som følge av avstanden til kysten. Middelnedbør i Brandrudsåa er omtrentlig 500mm [xgeo \[2013\]](#).

2.1.3.1 Klima mot 2100

Basert på klimamodeller er fremskrivingene for Norge mot 2100 at nedbøren og temperaturen vil øke i Sør-Norge. Dette er basert på ulike ned-skalerte, koblete globale klimamodeller. Ulike utslippsscenarioer brukes for å drive klimamodeller og på bakgrunn av dette har forskerne har kommet frem til høy, middel og lav klimafremskrivning. Middel angir gjennomsnittet av fremskrivingene. I Norge gir et middel av fremskrivingene en økt årsmiddeltemperatur 3.4 °C. For nedbør gir middelfremskrivingene en økning på 18% for hele landet, økningen på Østlandet er 12%. For Østlandet viser scenarier at sommernedbøren vil avta, men antall dager med kraftige regnbyger vil øke over hele landet. Beregningene peker mot at innlandet vil få en høyere temperaturøkning sammenliknet med til kysten og at økningen er størst om vinteren. Snøsesongens lengde og snøens dybde ser ut til å avta, men for noen høyfjells områder vil det i flere ti år fremover være en liten økning som et resultat av økt vinternedbør. Det er stor usikkerhet rundt modellene for snødybde, og en forventer at det vil være store lokale variasjoner [Hanssen-Bauer et al.](#)



FIGUR 2.4: Middelnedbørkart over Norge (MET 2015)

[2009].

Under en global oppvarming er det stor stor sannsynlighet for at mønsteret for flomhendelsene vil endre seg. Vårflommen vil kunne inntreffe tidligere [Lawrence and Hisdal \[2011\]](#). Da snømengden er fremskrevet til å minske, vil en kunne forvente at frekvensen for smeltevannflom vil bli minske. På grunn av dette er det forventet en nedgang i ekstreme flommer i indre Østland [Vatne \[2013a\]](#), men kombinasjonsflommer vil øke over hele landet. Det påpekes i rapporten *Klima i Norge 2100* at flom øker risikoen for jordskred. Det er blitt gjort kvalitative vurderinger av jorderosjon og sammen med økning i antall dager med kraftig nedbør vil jorderosjon øke. Dette vil særlig kunne inntreffe om høst og vinter nedbøren øker. Jordoverflaten vil da være mindre beskyttet av plantevekst [Hanssen-Bauer et al. \[2009\]](#).

I og med at faren for skred er nært knyttet til vanninnholdet i jorden, er det ikke entydig at Norge kan forvente mer skred i fremtiden. Høyere temperaturer vil føre til økt fordampning og vegetasjon, noe som vil bidra til mindre vann tilgjengelig i jorden.

Under den lille istid har utgravninger indikert en opphopning av flommer. Det kan tyde på at det er høyest skred aktivitet under kaldere klimatiske perioder [Brattebø \[2013\]](#)

.

Sletten og Blikra (2007) undersøkte jordskredaktiviteten de siste 10 000 år ved hjelp av flomskredmateriale avsatt på 4 ulike lokaliteter i øvre Gudbrandsdalen. 19 dype groper ble gravd i ulike avsetningvifter, stratigrafien ble undersøkt og organisk materiale ble datert. Undersøkelsene viser at flomskred har vært vanlig i Gudbrandsdalen i perioden etter siste istid, og 62 prosent av avsetningene ble vurdert som eldre enn 5000 år. I motsetninger til liknende undersøkelser på Vestlandet, viser ikke resultatene fra Gudbrandsdalen noen signifikant forskjell i jordskredaktivitet gjennom kalde og varme perioder. Dette kan ha en sammenheng med at jord- og flomskred i det kontinentale innlandsklima ofte blir utløst av kraftig snøsmelting, og kan ikke direkte overføres til perioder med klimaforverring [Sletten and Blikra \[2007\]](#).

Kapittel 3

Teori

3.1 Lidar

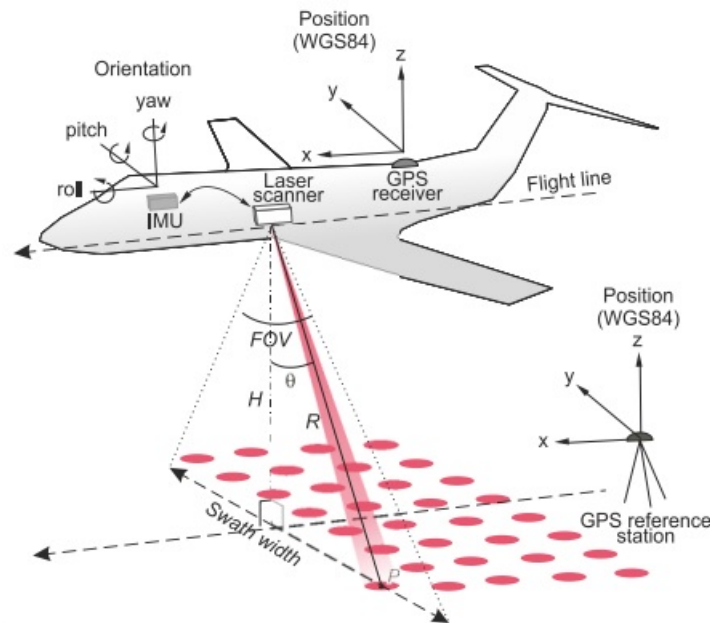
LiDAR er en forkortelse for Light Detection And Ranging og er en aktiv fjernanalyse metode. Laseren sender ut pulser av lys langs en vektor som er bestemt av to vinkler og registrerer retursignalet. For å bestemme avstanden mellom sensoren og objektet benyttes sammenhengen mellom tiden laserstrålen bruker for å bevege seg i rommet og den tiden det tar for strålen å nå et punkt [Du and Teng \[2007\]](#). Prinsippet er kjent som *Time of flight* kan uttrykkes ved likningen

$$R = \frac{v * t}{2} \tag{3.1}$$

der R er rekkevidden, v er farten (velocity) som er en kjent verdi og t er tiden strålen bruker.

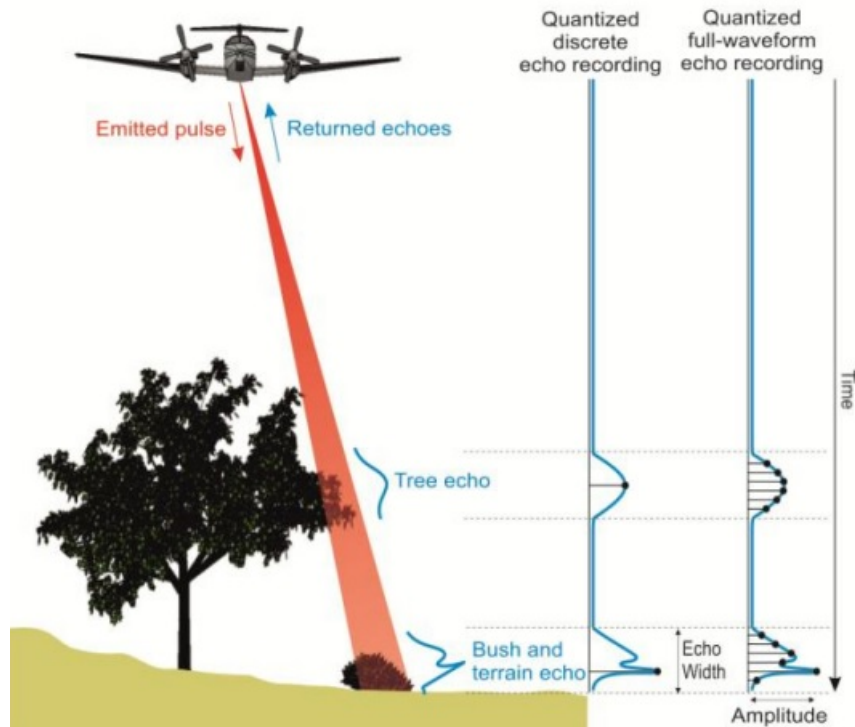
Flybåren laserskanning består av tre hovedkomponenter, selve laserskanneren, en *Global Navigation Satellite System* (GNSS) mottaker og *Inertial Measurement Unit* (IMU). GNSS målingene brukes til å dokumentere den geografiske posisjonen og IMU overvåker og registrer orienteringen til laserskanneren. Systemene registrer data uavhengig av hverandre. Integrering av målingene med en geometrisk modell gjør det mulig å kalkulere vektorene med en nøyaktighet ned til centimeters nivå. Resultatet fra en laserskanning er en punktsky og beskrives som rådataen. I punktskyen er det en samling med romlige

refererte punkter. Pulsmålingene blir lagret som punkter i 3D, med X, Y og Z verdier i tillegg til egenskapdata. For at punktene skal få romlige referanser som lengdegrad, breddegrad og ellipsoidisk høyde må dataene transformeres til et koordinatsystem. *Global Positioning System* (GPS) er mest brukt for GNSS posisjonering og vektorene refereres til WGS84 ellipsoiden. Deretter blir koordinatene transformert til et lokalt koordinatsystem, UTM sone 32N [Gallay \[2013\]](#).



FIGUR 3.1: Figuren viser hvordan flybåren laserskanning systemet er oppbygd. I flyet er GPS-mottaker, IMU og laserskanneren plassert [Gallay \[2013\]](#).

Retursignalene reflekteres fra alle objekter pulsen treffer på jordoverflaten. I det pulsen sendes ut er formen som en liten kule, men som følge av avstanden blir formen mer kjegleformet se figur 3.2. Diameteren på kjeglen i det den treffer objektet er fotavtrykket og størrelsen er avhengig av flyhøyde. En stor fordel med LiDAR teknologien er muligheten for å registrering av høyden på flere overflater. Det innebærer at en laserpuls kan sende flere retursignal (echoes) og systemet kan registre opp til 6 retursignaler. På grunn av dette kan en skille mellom punkter som representerer vegetasjon og markpunkt. DEM blir avledet fra det siste retursignalet.



FIGUR 3.2: Figuren viser hvordan flybåren laserskanning kan registrere flere retursignaler (echoes). Diskret laserskannerer kan motta flere signaler, men utviklingen av full waveform forbedrer kartleggingen i vegeterte områder [Gallay \[2013\]](#)

3.1.1 Nøyaktighet

Generelt er den vertikale nøyaktigheten to til tre ganger høyere enn den horisontale nøyaktigheten. Nøyaktigheten regner for å være 0.15–1 m i det vertikale planet og 1 m i det horisontale planet [Wilson \[2012a\]](#). Nøyaktigheten til laserpunktene er avhengig av indre og ytre faktorer. En betydelig andel av den totale feilkilden kan overføres til nøyaktigheten ved GPS og IMU systemet i tillegg til faktorer ved tekniske parametre og innstillingene til systemet. De ytre faktorene som påvirker nøyaktigheten er refleksjonen til objektene, atmosfæriske forhold, sollys, helningen til terrenget og hvor tett vegetasjonsdekket er. Den vertikale nøyaktigheten forverres ved økende helningsvinkel i terrenget [Gallay \[2013\]](#).

3.1.2 Filtrering

Flere studier har sammenliknet filtrerings algoritmer for punktskyene [Kobler et al. \[2007\]](#), [Vosselman et al. \[2004\]](#). Felles for de ulike metoden er at de sammenlikner punkter i en

gitt radius (*local neighbourhood*). Parametre som brukes til å skille markpunkt fra andre punkter er høydeforskjell, helningsvinkel, kurvatur eller intensiteten på signalet. Om et punkt overgår terskelverdien for sin radius blir det klassifisert som ikke-markpunkt.

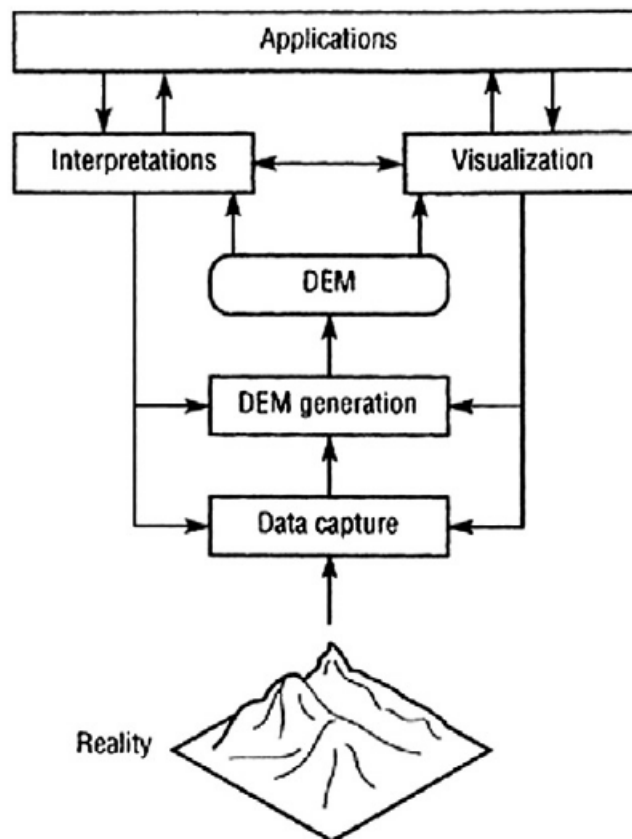
LAS-filer er et åpent standard filformat til utveksling av LiDAR data. I LAS-filene er punktskyene etterprosessert i et binærsystem som opprettholder den spesifikke informasjonen som er relatert til punktskyen. Ulike klasseinndelinger er lagres som heltall i koder. Kodene beskriver hvilken klasse punktene tilhører Yuan [2012]. Hvert punkt får en spesifikk klassifisering som definerer hvilket type objekt pulsen har blitt reflektert fra. Klassifiseringskodene er utarbeidet av *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS). En DEM som representerer terrenget uten vegetasjon og bygninger benytter klasse 2 (ground) ved generering.

3.2 Digital terrengmodell

”Model is an object or a concept which is used to represent something else. It is reality scaled down and converted to a form which we can comprehend” (Mayer 1985).

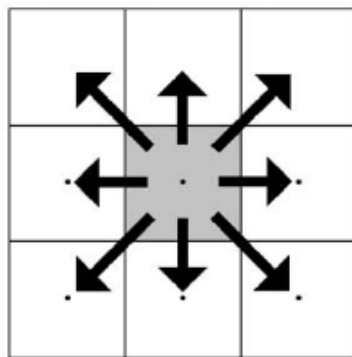
Normalt vil LiDAR målinger produsere *Digital Surface Models* (DSM), som inneholder informasjon om alle objekter på jordens overflate. Ved å fjerne objekter som trær og bygninger produserer en modell som representerer terrenget. DEM er en forkortelse for *digital elevation model*. I denne oppgaven brukes begrepet om en modell representerer jordens terrengoverflate. Kort sagt er DEM et rutenett i det kartesiske rommet, der hver rute har en høydeverdi som representerer høyden til jordens overflate. DEM er en matematisk modell, det innebærer at modellen er en statistisk representasjon av en kontinuerlig overflate. Modellen er oppbygd av et stort antall punkter med kjente x, y og z koordinater Li et al. [2010]. Prosessen ved å utarbeide en DEM består av tre hovedoppgaver. Det første er å måle jordoverflaten, så generere en modell ut i fra punktene. Den siste oppgaven består av å validere og håndtere i feilkilder.

Det finnes flere måter å representere en terrengoverflaten på. Analysene som denne oppgaven er bygget rundt, har utgangspunkt i DEM med rasterstruktur. Raster er en regulær



FIGUR 3.3: Figur som beskriver arbeidsflyt ved generering av en terrengmodell [Wilson \[2012a\]](#)

datamatrixe bestående av rader og kolonner. Hver celle har en høydeverdi Z og en X og Y . En av fordelene til rasterbasert DEM er den enkle strukturen og er kompatibel med data-prosessering. På grunn av dette kan relativt enkle algoritmer anvendes. Cellestørrelsen er definert av størrelsen på hver rute og gjør det mulig å kontrollere egenskapene ved DEM. Selv om det er flere fordeler med en raster basert DEM, har representasjonen noen ulemper. Rutenettet har en tendens til å underrepresentere kompleks topografi og overrepresentere en jevn og flat topografi. I forhold til hydrologisk modellering kan rutenettet ha en negativ innvirkning på resultatet av analysen. Avstanden til senteret i ruten, der høydeverdien er lagret, er ulik mellom cellene som er diagonalt og ved siden av og rett over [Hengl and Evans \[2009\]](#).

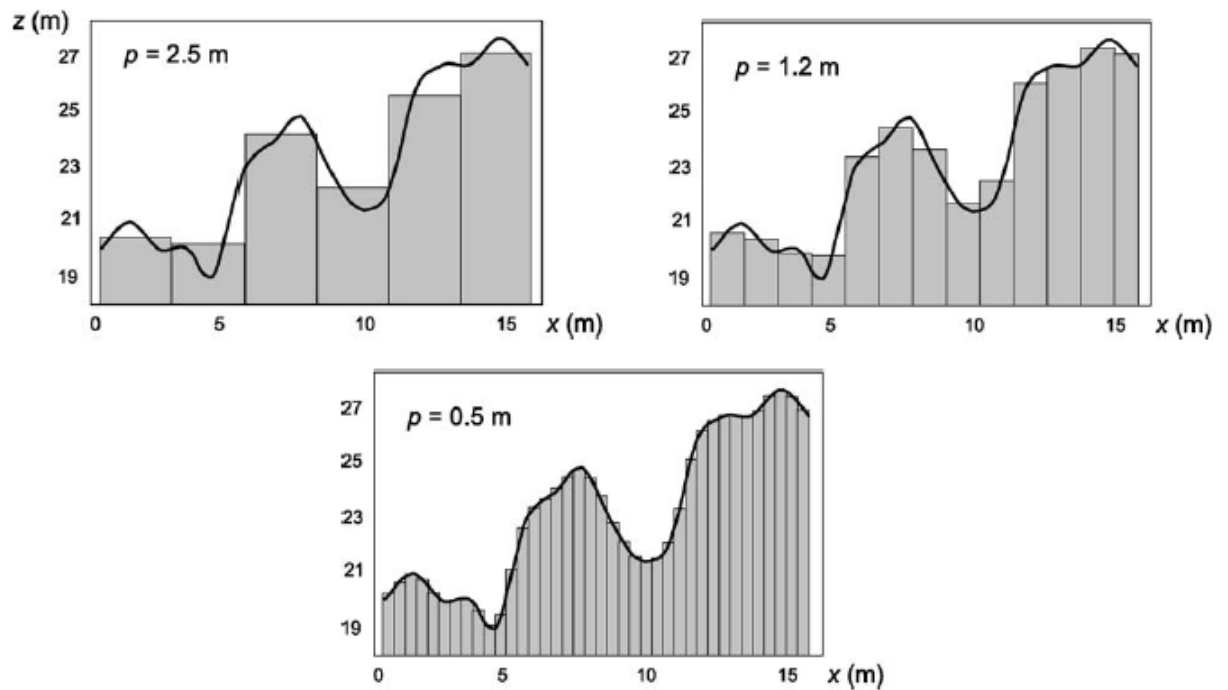


FIGUR 3.4: Figur som viser sammenhengen mellom innsamling av data og tolkning av DEM

[Hengl and Evans \[2009\]](#)

Cellestørrelsen i en DEM er relatert til begrepet skala. Skala er et viktig begrep i kartografi og har sammenheng med grad av detaljer og eller den romlige presisjonen til kartet. Skala er et begrep som er knyttet mot flere konsepter og kan derfor være tvetydig begrep. Skala kan brukes til å beskrive til grad av generalisering. Skala kan i flere sammenhenger være knyttet til romlige og/eller den temporære oppløsningen. I tillegg kan skalabegrepet anvendes om den romlige utbredelsen til studieområdet. I oppgaven vil oppløsning anvendes som begrep og vil erstatte skala begrepet.

DEM med en høy oppløsningen er satt sammen av celler med liten størrelse [Hengl and Evans \[2009\]](#). Figur 3.5 viser effekten cellestørrelse har når det kommer til å representere topografien ved et gitt sted. En cellestørrelse på 2.5m vil ikke i dette eksempelet kunne representere topografien på en hensiktsmessig måte. Det eksisterer ingen universell lov som beskriver hvilken cellestørrelse en bør anvende. Cellestørrelsen bør representere kompleksiteten i det aktuelle studieområdet med så lite data som mulig. Det innebærer at cellene skal være så store som mulig og samtidig oppnå den nøyaktigheten som prosjektet må ha. Det er et kompromiss mellom punkttettheten, kompleksiteten til terrenget og hvilken analyse som skal utføres.



FIGUR 3.5: Fremstilling som beskriver effekten oppløsningen har på representasjonen av topografien [Hengl and Evans \[2009\]](#)

3.3 Hydrologiske analyser

Hydrologi er studiet av bevegelsen, fordelingen og kvaliteten til vann på jorden. Bevegelsen til vann er hovedsaklig styrt av gravitasjonen. Bevegelsen kan kontrolleres av egenskaper ved de ulike materiale vannet renner igjennom eller over. Effekten gravitasjon har på vannet kan modelleres i en DEM, men egenskapene ved og forholdene til overflaten er mer utfordrerne [Gruber and Peckham \[2009\]](#).

Hydrologisk modellering i en GIS kontekst har ulike tilnærminger. I denne oppgaven er det topografien som ligger til grunn for de hydrologiske analysene. Modellering av flomveier ved flyalgoritmer og *Topographic wetness index* (TWI) avgjøres av høydeverdiene i DEM. Det er ikke blitt modellert med mengde nedbør, men flytalgoritmene og TWI gir indikasjoner på hvor i terrenget vannet drenerer.

I hydrologiske analyser er nedbørfeltet en viktig enhet og kan defineres som området oppstrøms et punkt der vannet vil dreneres til samme punkt. Yttergrensene er vannskillet. Med unntak av vann som fordamper vil all nedbør som faller i et nedbørfelt vil på et gitt tidspunkt dreneres ut igjennom utløpspunktet. Det er mengden nedbør og nedbørfeltets karakteristikk som danner grunnlaget for hvor mye vann som vil renne igjennom utløpspunktet. I DEM er nedbørfeltet en samling med celler som drenerer til en definert celle.

Den tiden det tar fra en nedbørhendelse til vannets passering ved utløpspunktet er avhengig av ulike forhold. Nedbøren kan magasineres en viss tid ved å for eksempel bli liggende som snø. Tilstedeværelse av vegetasjon vil forsinke avrenningen. Torv og myr vil magasinere vannet i nedbørfeltet. Det er flere geologiske, topografiske og metrologiske forhold som er avgjørende for mengde, form og hvor lang oppholdstid vannet har ved magasinering. Et områdes høydefordeling, helning og kompassretning har en sterk innvirkning på mikroklimaet, særlig med tanke på solinnstråling [Brattebø \[2013\]](#).

Å avgjøre hvilken retning vannet vil renne er avgjørende for hydrologisk modellering. Det er utviklet flere flytalgoritmer for å modellere vannets retning i en DEM. Det er i hovedsak to typer, *single flow* og *multiple flow*.

En av de eldste og mest brukte *single flow* algoritmene er D8 (eight flow direction). Flytalgoritmen avgjør hvilken retning vannet vil dreneres fra hver celle basert på en 3x3 bevegelig vindu [O'Callaghan and Mark \[1984\]](#). D8 modellerer at flere celler drenerer til en celle (konvergerende strøm), men den kan ikke modellere at en celle drenerer til flere celler (divergerende strøm). Metoden kan produsere tilfredsstillende resultater i nedbørfelt, men for eksempel ved en fjelltopp der strømmingen er divergerende kan verdiene som algoritmen produserer være feilaktige.

Det er utarbeidet en ulike *multiple flow* flytalgoritmer. Felles for disse er at de kan modellere at vannet kan dreneres fra en celle til flere celler (divergerende strøm). Metoden kan i noen tilfeller overestimere spredningen til vannet. D-infinity er en *multiple flow* flytalgoritme som er utarbeidet av Tarboton (1997). Metoden avgjør dreneringsretningen til cellene ved at retningfunksjonen er kontinuerlig og angies som en vinkel mellom 0 og

2π Tarboton [1997].

Topographic wetness index (TWI) blir brukt for å kvantifisere fordelingen vann i terrenget. Parametere beskriver tendensen en celle har til å akkumulere vann. TWI tar utgangspunkt i stabile forhold (steady state), og beskriver den romlige fordelingen og utbredelsen av fuktige soner Wilson and Gallant [2000b]. TWI er basert på jordens infiltrasjonsevne er konstant.

$$TWI = \ln \left[\frac{A}{\tan(\beta)} \right] \quad (3.2)$$

Høye verdier for TWI tilsier at cellene akkumulerer av vann. Slike forhold oppstår gjerne der A er stor (typisk i konvergerende områder av landskapet, og hvor β er liten, gjerne i nederste del av konkave skråninger der helningen er minkende. Slike forhold eksisterer gjerne ved dreneringsveier og i soner der vannet konsentreres i landskapet Wilson and Gallant [2000b].

Hydrologisk modellering er et selvstendig tema i oppgaven, men sammen med geomorfologiske parametre er det utarbeidet et aktsomhetskart for flom og jordskred i Brandrudsåa.

3.4 Aktsomhetskart for skred

Skred er en type massebevegelse der tyngdekraften er den drivende kraften. For at materialet i en skråning skal gå i brudd må de drivende kreftene overgå de stabiliserende kreftene. Skjærstresset er komponenten av massene som virker langs skråningen og skjærstyrken er gitt av friksjonen av massenes egenvekt som virker normalt på skråningen. Skjærstyrken økes med kohesive kreftene i materialet. Skråningstabilitet kan uttrykkes som en sikkerhetsfaktor (F)

$$F = \frac{\text{stabiliserende krefter}}{\text{drivende krefter}} \quad (3.3)$$

Stabiliserende kreftene til jorden er skjærstyrken, som bestemmes av friksjon og kohesjonskrefter. Drivende krefter er skjærstresset som påføres av gravitasjonen. Dersom sikkerhetsfaktoren går i favør mot de stabiliserende kreftene er skråningen stabil. Når de drivende kreftene overgår eller er lik de stabiliserende kreftene har skråningen en høyere sannsynlighet for utløsning av skred [Selby et al. \[1982\]](#).

I denne oppgaven er skredtypene jordskred og flomskred som ligger til grunn når begrepet skred anvendes. Brandrudsåa har ikke bart fjell og av naturlige årsaker er ikke fjellskred en del av oppgaven. Det fokuseres ikke på snøskred, da oppgaven fokuserer på forhold der nedbøren faller som regn på barmark.

Jordskred er en type skred som foregår i løsmasser og volumet på massen som er involvert er ofte begrenset. Bevegelsen er i motsetning til flomskred definert som ikke-flytende. Utløsningen av jordskred har sammenheng med klima. Nedbør og snøsmelting er en utløsende faktor da vannet fører til at porevannstrykket i materialet øker. Når porevannstrykket øker svekkes skjærstyrken til materialet ved at kornene løsmassene er sammensatt av presses fra hverandre. I fremtiden kan det forventes det en økning i jordskredfrekvensen i Norge. Økt nedbør og flere dager med intens nedbør er fremskrevet i klimascenarioene [Hanssen-Bauer et al. \[2009\]](#). Flomskred er en type skred som gjerne utløses som et jordskred. Men utløses i løsmasser som er lite konsoliderte og porevannstrykket fører til en kollaps i jordstrukturen. Det fører til at porevolumet minsker og porevannstrykket øker. Skredtypen har ofte en lang utløpsdistanse da materialet får et forhøyet moment da partiklene kolliderer med hverandre. Det forventes at flomskred har en forhøyet risiko i fremtidens klima [Berthling \[2013\]](#).

Hendelsekart viser skred som har gått og kan ha ulik grad av detaljer som er registret om hendelsene. Aktsomhetskart viser postensielle områder for skredløsning og utløpsdistansen. I faresonekart har skredfaren blitt kvantifisert ved en årlig sannsynlighet. Skredfaren er kartlagt detaljert og viser faresonen for rekkevidden til skredfaren med en bestemt sannsynlighet. Risikokart er faresonekart med tilleggs informasjon som hvilke konsekvenser skredet kan ha for i forholdt til tap av menneskeliv og materielle skader. Hvilke ressurser og metoder som anvendes i aktsomhetskartleggingen påvirker

hvor detaljerte de er. Men generelt vil en grovere kartlegging føre til større områder er definert som potensielle fareområder [NVE \[2014\]](#).

I denne oppgaven er skredfare kartlagt i kategorien aktsomhetskart. Det innebærer at det ikke er knyttet statistisk sannsynlighet til områdene som har høy aktsomhet. Kartene viser kun områder der ulike parametre som helning, kurvatur, TWI, arealbruk og løsmasser angir områder som kan være utsatt for skred.

Integrerings-metoder har tilfelles at de samler romlige data som er relatert til hverandre i en bestemt sammenheng. Metodene kan deles i to hovedgrener (1) kunnskapsdrevne (2) datadrevne. Kunnskapsbaserte metoder er basert på eksperters kunnskap med forankring i vitenskapen og litteratur. Datadrevende metoder skiller seg fra kunnskapsdrevne ved at de støtter seg kun på eksisterende løsninger og dataverdier [Sadeghi and Khalaj-masoumi \[2015\]](#).

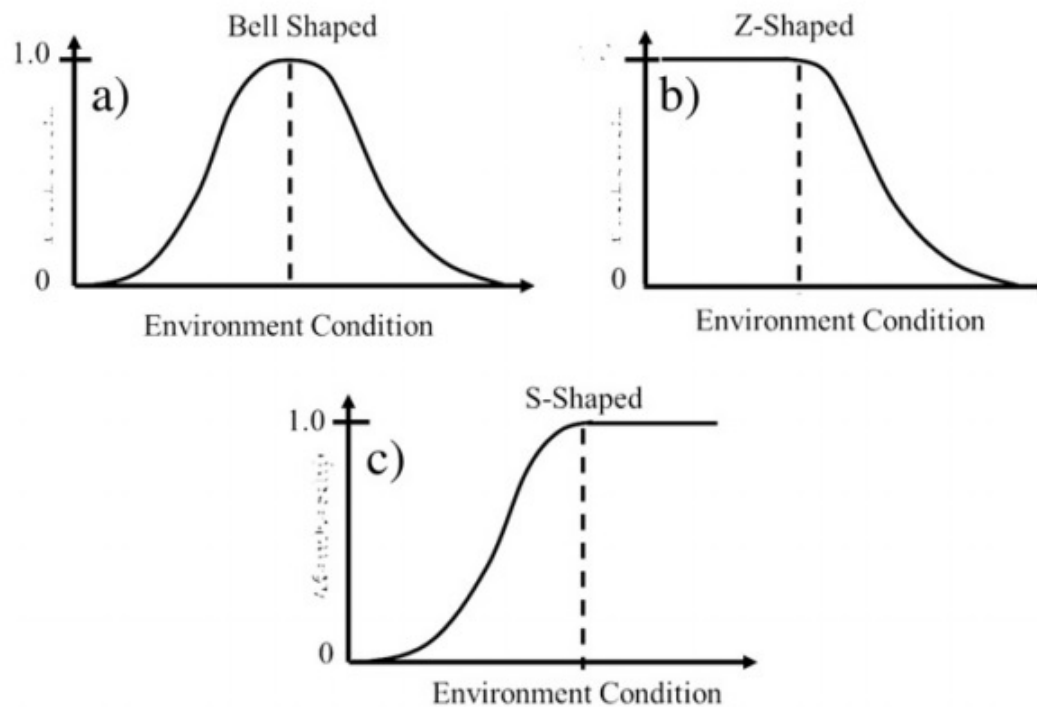
En av de tidligste anvendelser av LiDAR avledede DEM for aktsomhets kartlegging kom frem til at ved anvende høy oppløsning (1x1m) førte en betraktelig økning i resultater. Høy oppløselige LiDAR avledede DEM åpner for muligheten for en mer nøyaktig modellering av skred ved at en øker oppløsningen på geometriske karakteristikk. Ved flomskred modellering kan høy oppløselige DEM var grunnlaget for å modellere strømmingen [Jaboyedoff et al. \[2012\]](#). Det er utarbeidet flere metoder for aktsomhetskartlegging for skred. En av de enkleste modellene er probabilistiske metoder som for eksempel Frequency ratio. Ved metoden blir aktsomhetsgraden basert på raten av utløste skred og utvalgte parametre. Frekvensen til parametrene lagt sammen og en oppnår en aktsomhetsindex for området. Logisk regresjon, særlig med multivariat analyse, er en av de mest anvendte metodene i geovitenskap. Metoden baserer seg på korrelasjonen mellom utvalgte parametre og utløsningen av skred [Yilmaz \[2009\]](#). Artificial neural networks (ANN) er en konseptuell modell som prøver å imitere nervesystemet til hjernen. Det er en kunnskapsbasert metode og baserer seg på sammenhengen mellom utvalgte parametre og historiske skred. Det dannes et nettverk av ulike utfall som baseres på hvor vidt parametre er stabiliserende eller drivende. Metoden har ofte utgangspunkt i tidligere utløste skred [Gomez and Kavzoglu \[2005\]](#).

NVE har utarbeidet aktsomhetskart for jord- og flomskred i Norge. Det er anvendt en empirisk tilnærming for identifisering av kildeområder for jord- og flomskred. Metoden analyserer tre topografiske egenskaper; helning, plan-kurvatur og størrelse på det vann-tilførende området for hver celle med GIS-basert verktøy. Når terskelkriteriene er oppfylt for de tre egenskapene, blir cellen regnet som kildeområde. Terskelverdiene er tilpasset for ulike regioner. Skredutløpet blir beregnet fra hvert kildeområde ved hjelp av en *multiple flow* modell. Den tar hensyn til topografien langs utløpet. Retning skredet beveger seg blir avgjort ut i fra en probabilistisk metode. Der helningsvinkelen og en angitt energibegrensning avgjør skredets utløpsrekkevidde. Modelleringen tar ikke hensyn til vegetasjon og bebyggelse. Andre terrenginngrep vil påvirke beregningen av skredutløpet om inngrepet blir representert ved topografien i DEM [Fischer et al. \[2012\]](#).

3.5 *Fuzzy logic*

Tradisjonelt ble utarbeidelse av aktsomhetskart basert på fysikkens lover [Gemitzi et al. \[2011\]](#). *Fuzzy logic* er en kunnskapsdrevet overlagsanalyse. Teorien rundt *Fuzzy logic* ble først introdusert av Zadeh (1965). Metodikken brukes i ulike vitenskaplige retninger og kan anvendes i arbeide med komplekse problemer. Grunntanken til *Fuzzy logic* er å behandle romlige objekter som medlemmer av en samling eller en mengde. Objektet er fullverdig medlem tildeles den medlemskap verdi 1 og er ikke-medlem om den tildeles medlemskapverdi 0. En påstand kan være sann eller usann, men det som skiller *Fuzzy logic* fra binære metoder, er at påstanden være både sann og usann [Klir and Folger \[1988\]](#). Tildelt medlemskapverdi er gitt i det lukkede intervallet 1 og 0. Verdien reflekter hvor sterkt medlemskapet er.

I utgangspunktet er det ingen fasit på hvilken medlemskapverdi parametrene skal ha. Noen studier har basert medlemskaps verdiene på subjektive vurderinger, men andre baserer verdiene på statistiske analyser av dataene [Gemitzi et al. \[2011\]](#). Ved utarbeidelse av aktsomhetskart for flom- og jordskred det å indentifisere utløsende mekanismer avgjørende. Reliabiliteten og nøyaktighetene til dataene en benytter i analysen påvirker kvaliteten til aktsomhetskartet i stor grad. I denne oppgaven er medlemskapverdien basert på fordelingen av dataene til de ulike parametrene, tidligere studier og litteratur.



FIGUR 3.6: Figur som viser tre grunnleggende kurver for å beskrive fuzzy medlemskap-funksjon (a) klokkeform (b) Z-form (c) S-form [Zhu et al. \[2014\]](#)

Dataene kan ha en fordeling som tilsier at det er en lineær sammenheng mellom utløsningen av skred. Risikoen for skred stiger eller synker lineært med dataverdiene. Dataene kan ha en Z-form som er gjeldene dersom lave verdier under gjennomsnittet skal tildeles en høy medlemskapfunksjon. Der dataene har en S-form fordeling, er antagelsen at høye verdier skal ha en høy medlemskapverdi. Klokkeformet medlemskapfunksjonen anvendes om en forventer at verdier rundt gjennomsnittet skal ha en høy medlemskapverdi. I ArcMap er medlemskapfunksjonene for Z- og S-form henholdsvis Small og Large. MSlage og MS-small som gir mulighet for å definere hvilke verdier for gjennomsnitt og standardavvik som er gjeldene for fordelingen av parametrene.

For at resultatet skal bli troverdig må den som bruker metoden ha tilstrekkelig kunnskap. Det er to former for kunnskap som er viktig i denne sammenhengen (1) Hvilke faktorer kan påvirke studieområdets mottakelighet for skred? (2) Hvordan påvirker faktorene skredfare i det spesifikke studieområdet? [Zhu et al. \[2014\]](#). Analysen er sammensatt av parametre som vurderes å ha sammenheng med flom- og jordskredfare og medlemskapverdier basert på litteratur.

Til å begynne med ble 6 parametre identifisert som er utløsende faktorer for skred. Parametre deles i tre grupper topografiske, miljøbestemte og geologiske, [Ercanoglu and Gokceoglu \[2004\]](#). Topografiske parametre er helning, plan-kurvatur, profil-kurvatur og TWI kan avledes fra DEM. Miljøbestemte parametre i oppgaven er arealbruk og datagrunnlaget er hentet fra Institutt for skog og landskap. Geologiske parametre er berggrunn og løsmasser. Løsmasse- og berggrunnsdata er bearbeidet fra eksisterende digitalisert kart fra Norges geologiske undersøkelse.

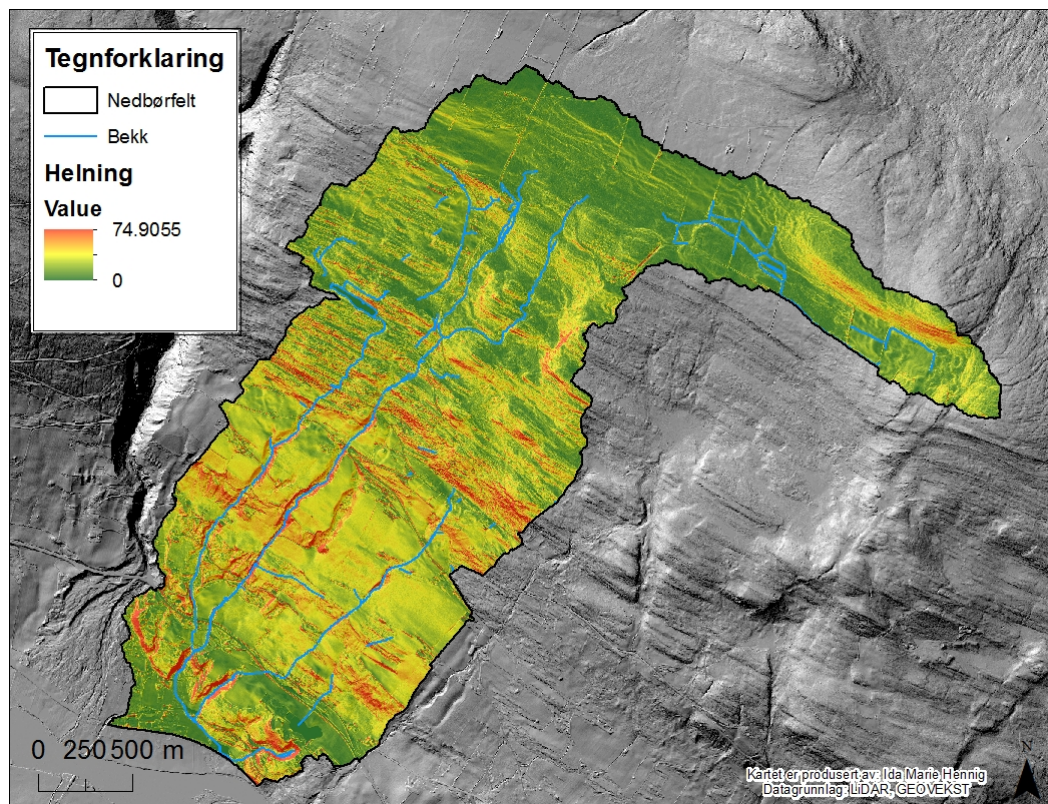
3.5.1 Topografiske parametre

Parametre som er direkte avledet fra DEM defineres som primærattributter. Helning, kompassretning, vann-tilførende område (*flow accumulation*) og kurvatur er eksempler på denne gruppen. De er avledet direkte fra topografien som DEM representerer. Sekundærattributter er avledet fra to eller flere primær attributter. Denne gruppen har stor betydning for analysen, da de kan beskrive et mønster, som for eksempel en funksjon av en prosess. Attributter som kan kvantifisere påvirkningen topografien har ved å distribuere vann i landskapet er viktig i geomorfologiske og hydrologiske analyser. Topographic wetness index (TWI) er et eksempel på sistnevnte gruppe [Wilson and Gallant \[2000b\]](#).

3.5.1.1 Helning

Det er en fysisk sammenheng mellom helning og utløsningen av skred. En økning i skråningens gradient resulterer i en økning i de drivende kreftene [Pradhan et al. \[2010\]](#). Helningen er den viktigste topografiske parametre for skred og er en kontrollerende faktor [Akgun et al. \[2012\]](#). Det må være en viss helning for at et skråning vil gå i brudd. For at jordskred skal utløses bør helningen være $>30^\circ$, men kan utløses i skråninger ned til 20° grader om forholdene ligger til rette. For flomskred er $25-30^\circ$ mest aktuelle [NVE \[2014\]](#). Selv om bratte skråningen betyr økning i de drivende kreftene, må ikke være bratt at det ikke er tilgjengelige løsmasser.

Helningen blir beskrevet som en vektor og har en kvantitet og en retning. I DEM er helningen den største endringsraten mellom høydeverdiene i et bevegelig 3x3 vindu. Helningen blir kalkulert ut i fra vinkelen mellom horisontalplanet og tangenten til overflaten. Tangenten står normal til overflaten og kan uttrykkes både i grader eller radianer. I oppgaven uttrykkes helningen i grader.



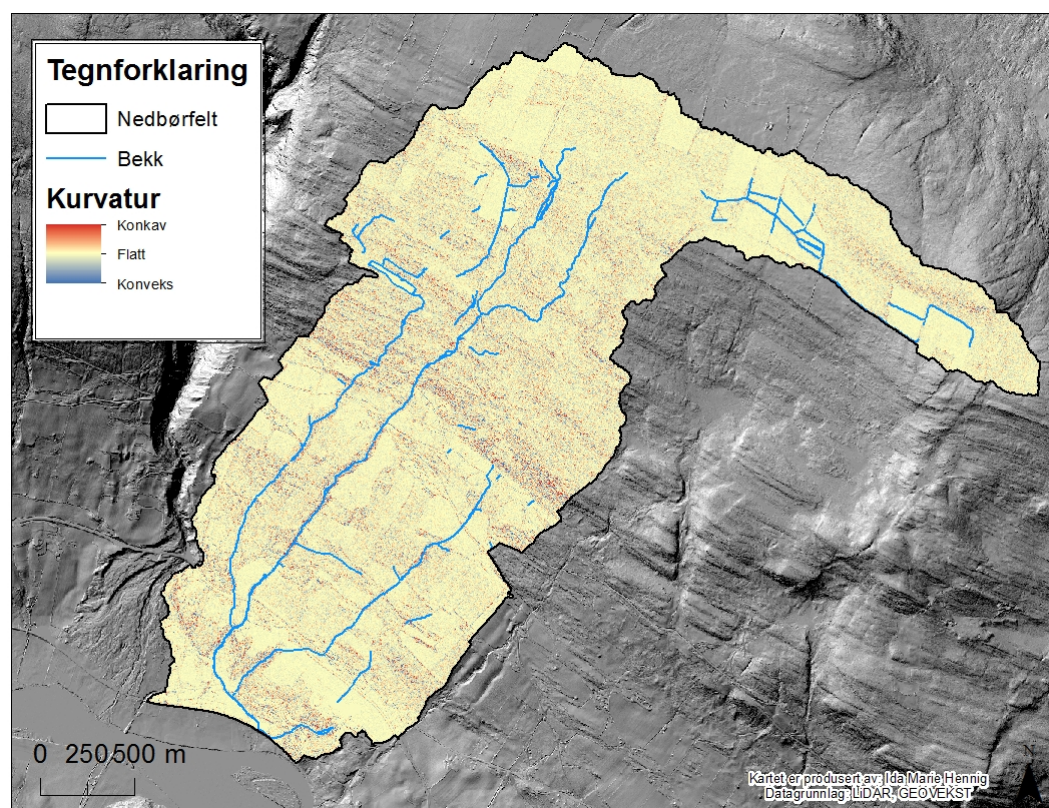
FIGUR 3.7: Kart som viser helningen i Brandrudsåa generert av DEM. Gjennomsnittlig helning er 12° . Nedbørfeltet har et flateret området øverst i feltet, men en brattere helning i den midtre delen. Røde områder markerer de bratteste områdene og er i hovedsak fluviale nedskjæringer og raviner.

Helningen påvirker den romlige fordelingen av vann som drenerer på overflaten og i løsmassene. Helningen påvirker hastigheten og avrenningsraten til overflateavrenningen. Skråningen vil i tillegg påvirke tilstedeværelsen av vegetasjon og arealbruk i området.

3.5.1.2 Kurvatur

Kurvatur beskriver formen terrenget har. Begrepet kurvatur er generelt definert som krumningen til en linje formet av skjæringspunktet i et tilfeldig plan med terrengets

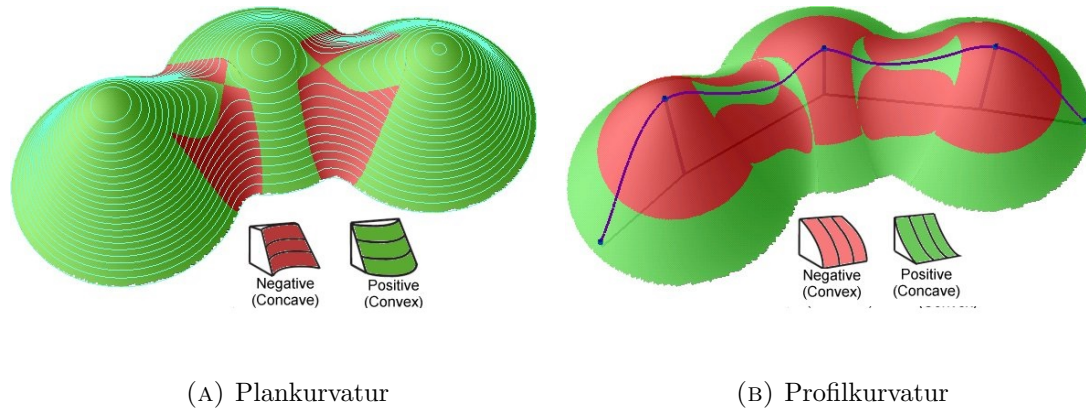
overflate [Wilson and Gallant \[2000a\]](#). Skråningformen kan deles i tre hovedtyper, plan, divergerende eller konvergerende. Divergente og plane skråninger er terrengformer som er mest stabile. Årsaken til at konvergente skråningformen er mest ustabil er at vannet kan samle seg midten som i en ravine. Det kan føre til et høyt porevannstrykk under intense nedbørhendelser [Sidle and Ochiai \[2006\]](#)



FIGUR 3.8: Kart som viser kurvaturen i Brandrudsåa generert fra DEM. Røde celler viser en konveks kurvatur og blå celler viser en konkav kurvatur. Beige celler er flate områder.

Fra kurvaturen kan det avledes raster som beskriver plan- og profil-kurvatur til Brandrudsåa. Plan-kurvaturen beskriver krumningen i horisontalplanet. I en DEM kan plan-kurvaturen beskrives som kurvaturen til en hypotetisk høydekurve som passerer gjennom en spesifikk celle. Plan-kurvatur egner seg til å skille i mellom rygger og daler. Plan-kurvaturen er avgjørende for om strømmingen er konvergerende eller divergerende [Wilson and Gallant \[2000a\]](#).

Profil-kurvaturen viser kurvaturen til overflaten i samme retning som helningen, det vertikale planet. Profil-kurvaturen påvirker strømningshastigheten til vannet som drenerer på overflaten. Videre har den en innvirkning på erosjon og avsetning. I områder som har konveks profil-kurvatur vil erosjon være mer dominerende og i konkave områder vil det være større mulighet for avsetning av materiale [Wilson and Gallant \[2000a\]](#).



FIGUR 3.9: (a) Figuren viser hvordan plan kurvaturen beskriver kurvaturen i horisontal retning. Rød farge viser en konkav kurvatur og grønt viser en konveks kurvatur (b) Figuren viser hvordan profil-kurvaturen beskriver profilet til skråningen. Med rødt illustreres det at skråningen er konveks og grønt beskriver at skråningen er konkav i det vertikale planet.

3.5.1.3 Topographic wetness index

TWI er definert som en sekundær attributt og er beskrevet tidligere i oppgaven. Parametre ble anvendt i analysene som en indikator på terrengets akkumulering av vann.

Små vassdrag vil hydrologisk og morfologisk bli påvirket ved tilførsel av sedimenter og kvist. Vassdragene er gjerne nært nyttet til sedimentkildene og reflekterer en blanding av skråningsprosesser og kanalprosesser [Hassan et al. \[2005\]](#). Vann er i stor grad knyttet til flom- og jordskred

3.5.2 Miljøbestemte parametre

Miljøbestemte parametre er i denne oppgaven arealbruken i Brandrudsåa. Parametrene vegetasjon, jordbruk og infrastruktur har påvirkning på skred. Særlig menneskelig aktivitet påvirker den naturlige avrenningen i nedbørfeltet. Ved endret avrenningforhold kan vann komme på avveie og faren for mye vann på steder som ikke er vanlig er stor. Dette kan øke risikoen for skred.

3.5.2.1 Arealbruk

Arealbruken er knyttet til effekten menneskelig aktivitet har til skred. Brandrudsåa inneholder skog, landbruk, infrastruktur og bebygde områder. Vegetasjon har generelt flere identifiserbare effekter på skråningstabilitet. Trær i skråninger kan være utsatt for så sterk vind at de kan velte. Når roten ligger blottlagt kan vann lettere trenger ned i bakken i de eksisterende rotkanalene og endre de hydrologiske forholdene. Bratte og glasialt utformede daler med tynt morenedekke er særlig utsatt for dette. Men generelt har vind liten effekt på vegetasjonen. En drivende effekt er vekten av vegetasjon øker belastningen, som fører til at skjærstresset som virker på skråningen øker. Skråningen må ha en viss gradient (ca 34 grader) for at belastningen skal overgå rotstyrken. Rotsystemet til vegetasjonen fører til en mekanisk styrking av løsmassene. Enkelte rotsystemer kan vokse ned og styrke den potensielle sonen for brudd, men de fleste rotsystemer er relativt grunne. Røttene vil i mange tilfeller binde løsmassene sammen og bidra til en tilsynelatende kohesjon.

Vegetasjon påvirker i tillegg vanninnholdet i jorden. En effekt er at den senker grunnvannspeilet. Blader som på faller til bakken vil kunne danne et beskyttende dekke som hinder uttørking, men røttene vil være med på å danne kanaler som vannet hurtig kan trekke ned i. Vegetasjon har flere effekter på skråning som virker sammen og mot hverandre. Generelt så vil trær i skråninger med et tynt dekke øke skjærstyrken til jorden med 60% eller mer. Indirekte vil vegetasjon ikke bestandig være formildende faktor. Gamle trær og kvist er en kilde materiale som kan føre til tette dreneringsveier i naturlige og menneskeskapte systemer [Selby et al. \[1982\]](#). I Brandrudsåa er vegetasjonsdekke vurdert som en stabiliserende faktor.

Jordbruk påvirker skråningstabiliteten ved å endre hydrologiske forholdene ved landskapet. Jordbruk kan i tillegg fører til større volum med løsmasser som er tilgjengelig og kan forflyttes. Dette kan igjen bidra til eksponering av mer jord og føre til en ubalanse [Hassan et al. \[2005\]](#). Særlig i forbindelse med innhøstingen Vann på avveie er sett på som en utløsning faktor til skred [NVE \[2014\]](#). I områder uten vegetasjon vil mengden og farten til overflateavrenningen øke. Jordbrukarealene i Brandrudsåa blir i denne sammenhengen vurdert som et parameter som indirekte bidrar i utløsning av skred.

3.5.3 Geologiske parametre

Geologiske parametre som ble identifisert i Branrudsåa er løsmasser og berggrunn. Parametre som ble viktig i forhold til løsmassene var mektigheten og hvilken opphav materialene har. Berggrunnsgeologien ble prøvd ut, men ble ikke en del av aktsomhetskartet.

3.5.3.1 Løsmasse

Det må være tilgjengelige løsmasser for at et skred skal kunne utløses. Hvilken tykkelse dekket har, kornfordeling og lagdeling på løsmassene påvirker skredfaren. Stor mektighet på løsmassene vil kunne ha innvirkning på volumet skredene potensielt kan oppnå. Sammensetningen på materialet i løsmassene påvirker skredfaren. Ulike kornsammensetninger påvirker styrken til materiale og evnen til å hvor mye vann som kan bygges opp. Lagdelingen har innflytelse da mindre permeable lag i løsmassene som kan føre til et forhøyet porevannstrykk [NVE \[2014\]](#).

3.5.3.2 Berggrunn

Bergarter som forvitrer lett bygger raskere opp nytt jordsmonn i gamle skredløp. Nye skred i samme skredbane kan ha et slik opphav over tid. Skifer og fyllitt er bergarter som kan forvitre relativt lett. Forvitringen bidrar til dannelse og oppbygging av det lokale jordsmonnet. Forvittringsmateriale fra fyllitt kan inneholde leirpartikler som påvirker permeabiliteten og gjør forvittringsmaterialet mindre permeabelt [Ramberg et al. \[2006\]](#).

3.5.4 Overlagsfunksjon i *Fuzzy logic*

I *Fuzzy logic* overlagsanalyse er det fem funksjonere som angir hvordan parametrene med medlemskapverdier skal generer resultatet fra overlagsanalysen. Medlemskapfunksjonene er Fuzzy AND, Fuzzy OR, Fuzzy SUM, Fuzzy Product og Fuzzy GAMMA.

Fuzzy AND tilsvare Boolean AND (logical intersection). Overlagsanalysen er definert

$$\mu_{combination} = MIN(\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots) \quad (3.4)$$

Hvor $\mu_{combination}$ er den kalkulerte fuzzy medlemskapfunksjonen, og $\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots$ er medlemskapverdien for henholdsvis kartlag A, B, C, og så videre.

Fuzzy AND vil gi cellen den minste medlemskapverdien til parametrene som er med i analysen. Parametre må ha høye medlemskapverdier i alle parametrene for å få høy verdi i resultatet. Denne metoden fungerer hvis en ønsker at å finne områder som møter alle kriteriene.

Fuzzy OR er tilsvarende Boolean OR (logical union). Overlagsanalysen er definert

$$\mu_{combination} = MAX(\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots) \quad (3.5)$$

Funksjonen tildeler den høyeste verdien til alle medlemskapverdien til hver celle. Om kun en av parametrene har høy medlemskaps verdi vil resultatet tildele cellen en høy verdi. Det kan anvendes til å finne områder som møter et av kriteriene. Fuzzy OR vil ikke være hensiktsmessig om en har mange parametre som alene ikke er et utløsende parametre. For eksempel vil ikke tilstedeværelse av vann i et flatt område utløse skred, selv om vann er sterkt knyttet til jordskred.

Fuzzy algebraisk PRODUCT er definert

$$\mu_{combination} = \prod_{i=1}^n \mu_i \quad (3.6)$$

Fuzzy Product vil trekke frem områdene som har høy medlemskapverdi i alle parametrene. Det gjør funksjonen ved å multiplisere verdiene for alle parametrene i hver celle og i resultatet har ingen av cellene høyere verdier en den laveste verdien. Dette fører til at det kan bli svært lave verdier om en har mange parametre med i analysen.

Fuzzy algebraisk SUM er definert

$$\mu_{combination} = \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \quad (3.7)$$

Fuzzy SUM summerer medlemskapverdiene til parametrene og cellene i resultatet vil kunne oppnå en høy verdi.

Fuzzy gamma er et algebraisk produkt av SUM og product.

$$\mu_{combination} = (\text{Fuzzy algebraic sum})^\lambda * (\text{Fuzzy algebraic product})^{1-\lambda} \quad (3.8)$$

Med en høy gamma faktor vil cellene i resultatet øke og funksjonen tilsvarer fuzzy SUM. Med gamma faktor på 0 vil resultatet bli tilsvarende Fuzzy PRODUCT. Det er hensiktsmessig å bruke Fuzzy gamma når vil ha verdier større enn Fuzzy OR men mindre enn Fuzzy SUM [Lee \[2007\]](#).

I aktsomhets analysen ble Fuzzy OR og Fuzzy AND anvendt i to submodeller. Fuzzy GAMMA (λ 0.9) er valgt medlemskapfunksjon for hovedmodellen.

Kapittel 4

Metode

4.1 Metode

4.1.1 Datainnsamling

LiDAR-skanninger ble utført over pilotfeltet i to perioder mellom 2009-2014. Disse danner hovedgrunnet for analysene i dette studiet. Felles KartdataBase (FKB) og kartserien N50 er benyttet som grunnlagsdata i oppgaven. Dette er data hvor informasjon om generelle objekter i det fysiske landskapet er samlet og beskrevet.

FKB er kartdatabase som inneholder vektordata og eies av Geovekst samarbeidet. FKB-data som er relevant i denne oppgaven var vei, jernbane, bygninger og vannveier. FKB består av meget detaljerte grunnlandsdata. N50 er en kartdatabase som er et av Statens kartverks offisielle basisdataset. N50 har målestokk 1:50 000 og er tilgjengelig for nedlasting fra Norge Digitalt.

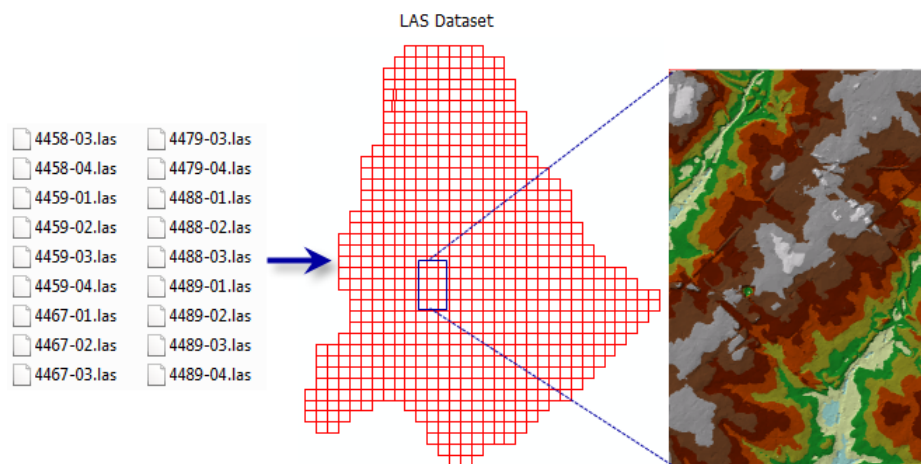
Stedfesting av stikkrenner er mottatt fra Jernbaneverket (Per Virehn og NIFS prosjektet) Punktene har blitt målt inn med GPS og totalstasjon. Dataene har opphav fra flere institusjoner. Stikkrenner fra fylkesvei (403, 405, 407) og europavei (E6) stammer fra Statens Vegvesen og den Nasjonale Vegdatabasen (NVDB). Jernbaneverket og Banenett har gitt opphavet til informasjonen om Dovrebanens stikkrenner. Videre har Sør-Fron

kommune stedfestet stikkrenner i det kommunale vegnettet. Noen av stikkrenne stedfestet med hjelp av ortofotos og befaringer utført i 2013 [Virehn \[2014\]](#).

Skadepunktene har blitt brukt til å validere resultatene. Dataene består av GPS-punkter over skader og polygoner som representerer større skadeområder. Dataene er innsamlet fra befaringer og skaderapporter fra flommen i 2013 av Sør-Fron kommune. Befaringer ble utført av NIFS og Jernbaneverkets representanter Steinar Myrabø, Per Virhen og Maria Hetland Olsen.

4.1.2 LiDAR og LAS-filer

LAS-filene er delt opp i mindre deler som hensiktsmessig da filene består av store mengder informasjon. Brandrudsåa består av 60 LAS filer og 524 579 701 LiDAR punkter, av disse punktene er 188 266 834 klassifisert som markpunkt. I ArcMap opprettes et LAS-dataset som er en posisjons-giver til filene som er lagret på hard-disken.



FIGUR 4.1: Figur som viser hvordan LAS dataset er oppbygd. Til venstre er LAS-filene lagret på harddisken og utsnittet viser hvordan LAS-dataset fremstår i ArcMap [ESRI \[2013\]](#)

LiDAR datene blir levert med en romlig referanse og det er viktig at alle kartdata som skal anvendes i analysene har samme romlige referanse. Brandrudsåas prosjekterte koordinatsystem er WGS 1984, UTM sone 32N. Det er en *Transvers Mercator projeksjon* og datum er WGS 1984.

4.1.2.1 Oppløsning

For raster data vil en angitt oppløsning referere til en cellestørrelse. Denne størrelsen uttrykkes som en avstand og representerer avstanden i terrenget. Liten størrelse på cellene gir høy oppløsning Liu [2008]. Betydningen av cellestørrelse avhenger av kvaliteten på data terrenget avledes fra, samt hvor komplekst terrenget er. Det er viktig å ta med i betraktning hvilke analyser en skal utføre og hvilken oppløsning studiet faktisk trenger Hengl [2006].

I denne oppgaven er cellestørrelsen estimert ut i fra en metode foreslått av McCullagh (1988). Her estimeres størrelsen på cellen (S) i fra :

$$S = \sqrt{\frac{A}{n}} \quad (4.1)$$

Her angir n antall terrengpunkt og A områdets utstrekning. Bruk av formelen fører til at oppløsningen på DEM vil ha sammenheng med tettheten til datene. En optimal cellestørrelse vil reflektere variabiliteten til terrenget. Den vil også ha mulighet til å representere egenskaper ved terrenget Liu [2008]. Utregning av likning (3) innsatte verdier for denne studien:

$$S = \sqrt{\frac{34560000m^2}{188266834punkt}} \approx 0.43m/punkt \quad (4.2)$$

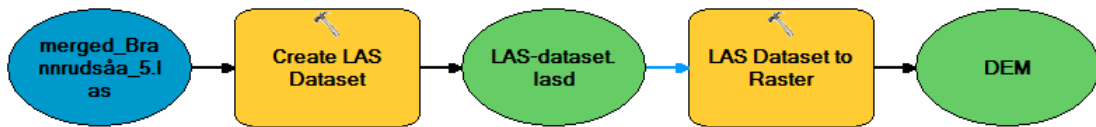
I denne studien ble størrelsen på cellene i terrenget beregnet til ≈ 0.43 m. Denne metoden tar ikke i betraktning kompleksiteten til terrenget Liu [2008]. Terrenget er ikke vurdert som veldig komplekst, det er en relativ jevn topografi. Det ble derfor det valgt en konstant cellestørrelse på 1x1 meter, og vurderes som innenbords anbefalt verdi. DEM er vurdert til å representere terrengets egenskaper ned til den grad av detaljer som er hensiktsmessig for studiet.

4.1.3 Generering av DEM

I denne oppgaven ble DEM generert ved anvendelse av to ulike metoder. I den ene metoden ble modellene avledet direkte fra LAS-filer med markpunkt. Den andre kombinerte

LAS-filer med markpunkt og FKB-data i et *Terrain* dataset.

4.1.3.1 LAS til Raster



FIGUR 4.2: Modell som beskriver arbeidsflyten fra LAS-filer til DEM.

En DEM som er avledet fra LAS-filer bruker *binning* for å avgjøre høydeverdien til hver celle i rasteret. Metoden grupperer punktene som faller i celle. Der det er flere høydeverdier som faller innenfor en celle kan flere metoder anvendes.

For å avgjøre celleverdien ble alle tilgjengelige metoder i ARcMap utprøvd. *Average* er teknikken som tildeler cellen gjennomsnittsverdien av alle punktene som er i cellen. *Minimum* og *maksimum* gir cellen henholdsvis minimums- og maksimums verdien til punktene som befinner seg i den. *Inverse distance weighting* (IDW) er en vektet interpolering, der avstanden til punktene avgjør hvilken innflytelse punktene skal ha på verdien i cellen. *Nearest Neighbour* bruker de nærmeste punktene til å avgjøre verdien [ESRI \[2014\]](#).

4.1.3.2 LAS via *Terrain* til Raster



FIGUR 4.3: Modell som beskriver en forenklet arbeidsflyt fra LAS-filer og FKB-data til *Terrain*.

En annen metode er å kombinere LAS-filene med FKB-data. Årsaken til å prøve metoden er at i hydrologiske analyser der drenering og skader på infrastruktur er studiets

formål ønsker en at grøfter og veikant tydelig trer frem i modellen. Dette er for å sikre at vannet drenerer i grøften og ikke over veien som kan forekomme om datagrunnlaget ikke er tilstrekkelig.

Terrain er et datasett med TIN-struktur og avledes fra multipoints. LAS-filene med markpunkt omdannes til multipoint features i en geodatabase. For å utarbeide TIN-strukturen må verdien til nodene interpolere fra multipoint datasettet. Interpoleringsteknikkene Natural neighbour og Linear tilgjengelige i ArcMap og ble benyttet. I *Terrain* kan ulike type data implementeres for å forsterke terrengmodellen. I studiet ble høydedata fra veipolygoner fra FKB anvendt. I datasettet er det bestemte regler på hvordan hvordan dataene blir brukt til å definere overflaten. FKB-dataen blir satt som hard breaklines og verdien er koordinathøyde (Z) [ESRI \[2014\]](#).

4.1.4 *Root Mean Square Error*

Root Mean Square Error (RMSE) er utført for å avgjøre hvilken versjon av DEM analysene skal ut anvendes. Høyder fra celler i DEM blir sammenliknet med høyder på de samme geografiske punktene som er målt med totalstasjon. Punktene brukes til å kalkulere RMSE mellom den observerte verdi og den virkelige verdi. RMSE er avhenging av to forhold (1) størrelsen på utvalget. Et stort utvalg, fører til lavere RMSE (2) Standardavviket i utvalget, jo større standard avvik, jo høyere er RMSE [Wilson \[2012b\]](#). Grunlaget for RMSE analysen i denne oppgaven er 165 punkt med z-verdi som er målt inn av Statens Vegvesen vet bruk av totalstasjon.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{field} - Z_{DMI_i})^2}{n}} \quad (4.3)$$

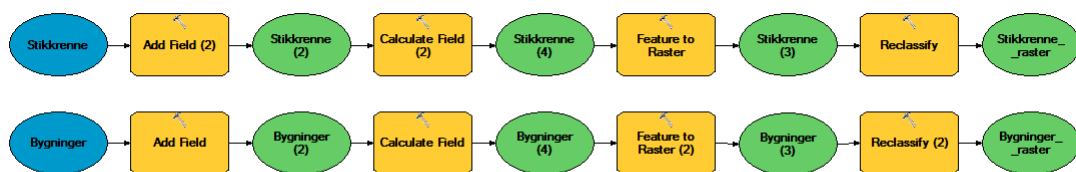
Der n er antall referansepunkt, Z field er det målte høydepunktet og Z DEM er høyden som er hentet ut fra DEM [Oh and Pradhan \[2011\]](#). Forskjellen ble i tillegg analysert ved standardavvik. Referansepunktene ble testet mot to versjoner av samme DEM. (1) Umodifisert DEM (2) Modifisert DEM med senkede stikkrenner.

4.1.5 Modifisering av DEM for modellering av flomveier og TWI

Et av studiets hovedtema er modellering av flomveier ved hjelp av ulike algoritmer for å finne sårbare områder i Brandrudsåa. For å gjøre modellen klar for hydrologiske analyser ble det utført tre forberedende metoder. Terrengmodellen kan inneholde feilkilder i høydedata (z) som kan føre til groper. Gropene kan påvirke strømningslinjen og kan føre til unaturlige avbrudd i drenerings mønsteret [Reuter et al. \[2009\]](#).

Laserstrålene vil ikke kunne identifisere stikkrenner og kulverter og for å opprettholde et drenerings mønster så nært virkeligheten som mulig må stikkrennene implementeres i modellen. Siden terrengmodellene er avledet fra markpunkt er ikke punkter som er klassifisert som bygninger en del av modellen. Bygninger ble manipulert i modellen da de oppfattes som en fysisk barriere som påvirker dreneringsmønsteret.

4.1.5.1 Manipulering av DEM

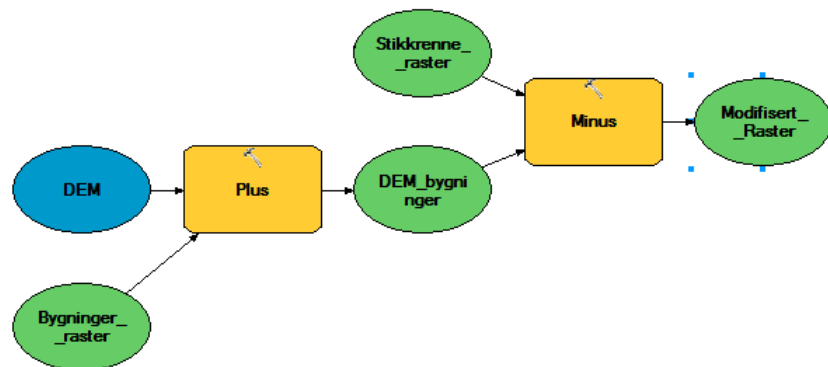


FIGUR 4.4: Modell som beskriver arbeidsflyten ved å heve bygninger og senke stikkrenner.

I FKB er bygninger representert som polygoner. For at terrengmodellen skal representere virkeligheten på en best mulig måte ble bygningsflaten hevet fra terrenget. Vannet vil som oftes drenere rundt bygningene og ikke igjennom.

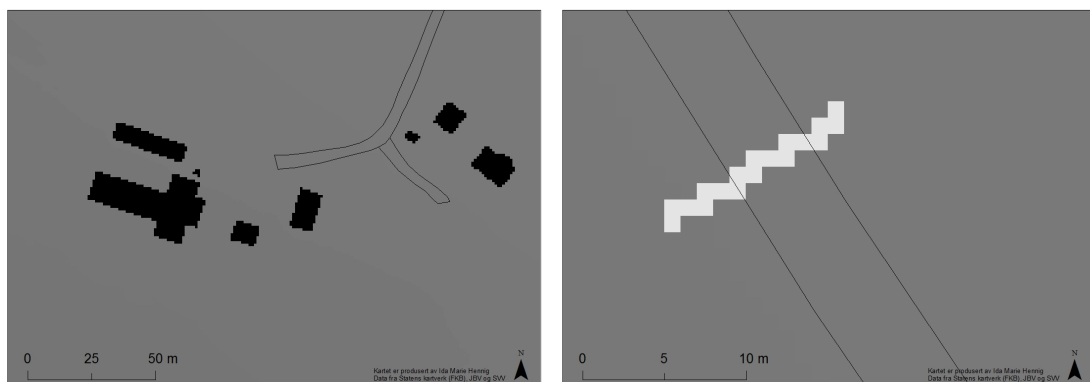
Første steg er å konvertere polygonene til raster og reklassifisere celleverdien. Celler som representerer bygninger tildeles celleverdi 10, alle resterende celler klassifiseres til verdien 0. Tilsvarende metode ble gjort med stikkrenner. Brandrudsåas 130 stikkrenner ble tegnet som polyline ut i fra GPS-posisjonen til stikkrennene. Der etter konverteres polyline dataene til raster. Cellene som representerer stikkrenner ble reklassifisert til

verdi 10 og de resterende celle får verdien 0.



FIGUR 4.5: Modell som beskriver arbeidsflyten modifisere opprinnelig DEM.

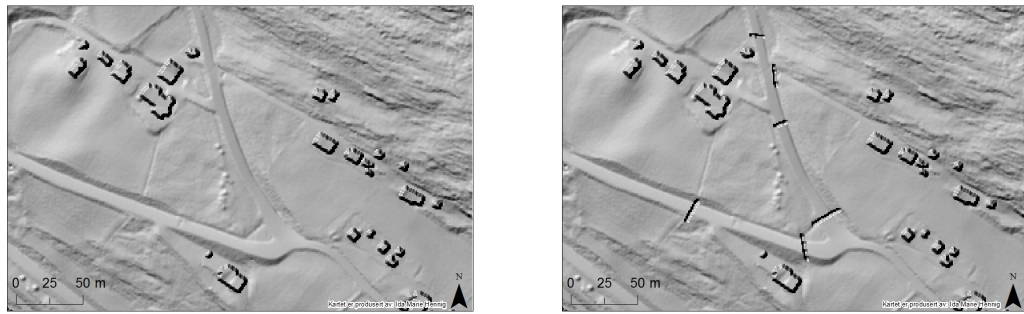
Rasteret med bygninger blir lagt til den opprinnelige terrengmodellen og rasteret med stikkrennene blir subtrahert fra til den opprinnelige terrengmodellen. Ved å kun heve bygninger og ikke stikkrennene oppstår en situasjon der alle stikkrenne i feltet er stengt.



(A) Bygninger hevet med 10m i DEM (B) Stikkrenner senket med 10m i DEM for vann

FIGUR 4.6: Modifisering av DEM

Figur 4.7 viser en fjellskygge av modifisering av stikkrenner (a) representerer en situasjon der en har tette stikkrenner og andre andre versjonen av modellen (b) viser en situasjon der alle stikkrennene er åpne og fungerer optimalt.



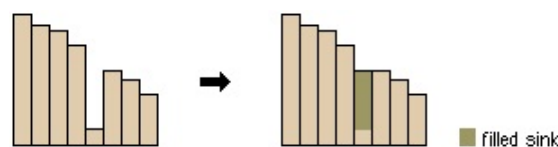
(A) Fjellskygge av DEM med hevet bygninger, (B) Fjellskygge av DEM med nedsenket stikkrenner uten stikkrenner

FIGUR 4.7: Hillshade av to versjoner av samme DEM

4.1.5.2 *Fill*

Den siste forberedende metoden er å fylle gropene i terrengmodellen. En grop er en celle som har en udefinert dreneringsretning, altså ingen av de nærmeste cellene har lavere høyde verdi. Feilaktige gropene kan være et resultat av omgjøringen av tall med desimalverdier til heltall og valg av cellestørrelse i terrengmodellen .

I oppgaven ble gropene fylt med verktøyet *Fill*. *Fill* øker Z-verdien til cellen til å tilsvare den verdien som neste celle har. Slik kan en modellere en sammenhengende strøm og gropene fører ikke til avbrudd. Dette er den eldste, men fortsatt den mest brukte metoden til formålet. Ulempen med metoden er kan det oppstå kunstige flate områder om det er mange groper [Reuter et al. \[2009\]](#).



FIGUR 4.8: Figur som viser hvordan verktøyet "Fill" fungerer. "Fill" fjerner gropene i ved å tildele gropen verdien til cellen nedstrøms [ESRI \[2014\]](#).

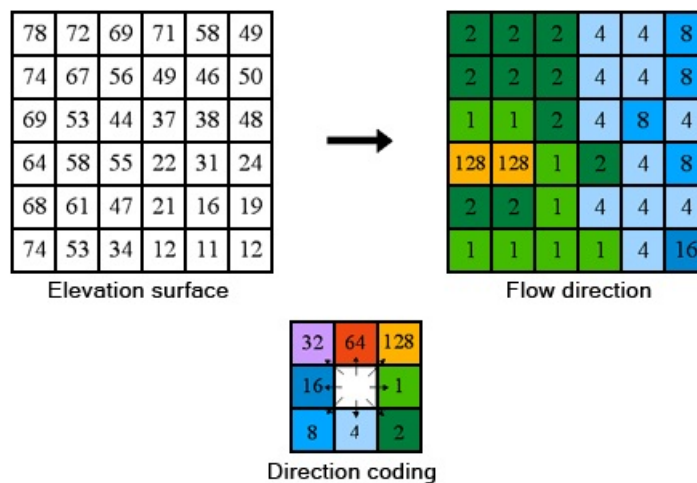
4.1.6 Flytalgoritmer

Flytalgoritmer er en felles betegnelse på algoritmer som avgjør hvilken vei en celle vil drenere til. I oppgaven sammenliknes to algoritmer som har en distinkt forskjell. *D8*

algoritmen modellerer strømning til en cell, single flow. *D-infinity* modellerer strømning til flere celler.

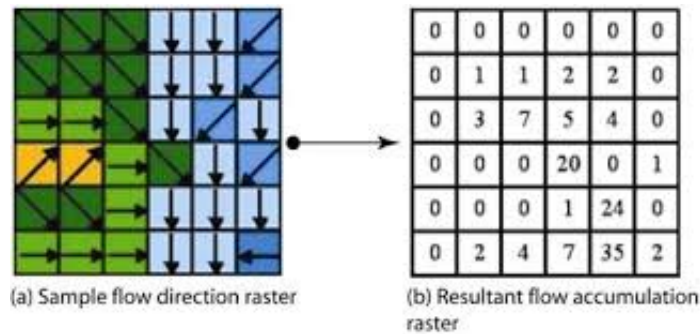
4.1.6.1 *D8*

D8 algoritmen fungerer ved at et bevegelig vindu plasserer over en celle og strømningsretning blir kalkulert ut i fra differansen i z-verdi. strømningsretning blir til den cellen der den fallende gradienten (helningsvinkelen) er størst mellom cellen og dens åtte naboceller. Vinduet på 3x3 celler beveger seg over hele rasteret. Metoden kan modellere at flere celler drenerer i samme celle men om flere celler har den samme fallende gradienten vil metoden kun modellere strømningsretningen til en celle [Gruber and Peckham \[2009\]](#).



FIGUR 4.9: Figur som visualiserer hvordan *D8* algoritmen avgjør hvilken strømningsretning cellen oppnår [ESRI \[2014\]](#)

Flow accumulation er et verktøy som kalkulerer vanntilførende område, det vil si hvor i terrengmodellen vannet vil kunne akkumulere. I verktøyet benytter resultatet fra verktøyet Flow Direction til å gi hver celle en verdi som tilsvarer antall celler som drener til den aktuelle cellen. Resultatet modellerer hvor vannet vil akkumulere i terrenget og kan anvendes til å identifisere bekkeløp og flomveier.



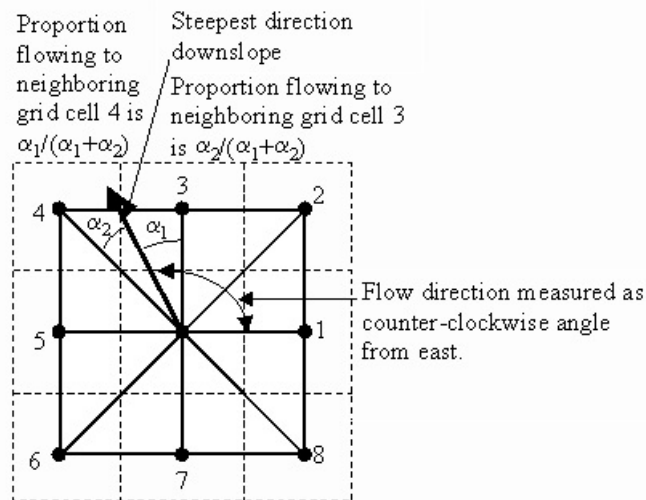
FIGUR 4.10: Figur som viser hvordan vanntilførende område blir kalkulert fra strømningsretningen [ESRI \[2014\]](#)

4.1.6.2 *D-infinity*

Det eksisterer mange ulike algoritmer for å modellere strømningsretning til flere enn en celle, kjent som multiple flow algoritmer [Gruber and Peckham \[2009\]](#). I denne oppgaven ble det valgt å benytte seg av *D-infinity* som er tilgjengelig via programvaren TauDEM (*Terrain Analysis Using Digital Elevation Models*). TauDEM er gratis og en delvis åpen programvare utarbeidet av David G. Tarboton ved Utah State University (USA). Verktøyene kan importeres og brukes i ArcMap.

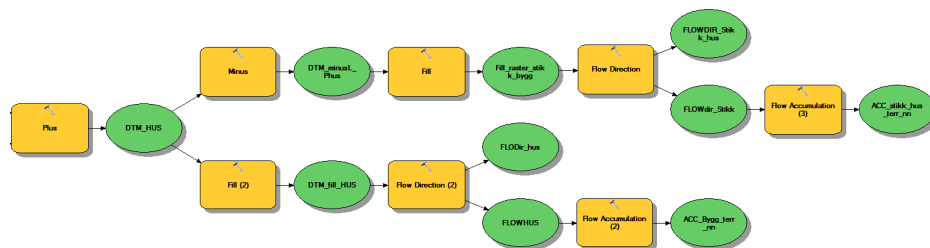
I *D-infinity* algoritmen blir strømningsretning kodet som en vinkel målt i radianer. Vinkelen er beregnet i positiv dreieretning fra øst (mot klokken) og vil kunne inneha en kontinuerlig størrelse mellom 0 og 2π . Retningen blir beregnet ut i fra bratteste nedgående retning i åtte triangulære flater oppgitt i et 3x3 vindu. Disse flatene blir formet mellom hver celle og dens naboer. Både strømningsretning og helning blir regnet ut i fra størrelse og retning til den bratteste vektoren. Å avgjøre strømningsretning i flate områder kan være en utfordring [Tarboton \[1997\]](#). *D-infinity* anvender en metode utarbeidet av Garbrecht and Martz (1997). For flate områder øker algoritmen trinnvis høydeverdien til cellene, slik at informasjonen til omliggende høydeverdier blir inkludert. To uavhengige gradienter blir påtvunget på det flate området. Det resulterer i en gradient som går fra høyere liggende celler og ned til det flate område, og en gradient fra det flate området og ned til lavere liggende celler [Garbrecht and Martz \[1997\]](#).

Vanntilførende område (*Flow accumulation*) blir i første omgang regnet fra en celle. I neste omgang blir det lagt til andel vanntilførsel fra alle celler oppstrøms. Strømningen fra hver celle drenerer enten til en celle hvis vinkelen faller innenfor $(0, \pi/2, \pi, 3\pi/2)$



FIGUR 4.11: Figur som viser hvordan *D-infinity* baserer seg på den bratteste flaten på en triangulær flate Tarboton [1997]

eller i diagonal ($\pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4, 7\pi/4$) retning. Men vinkelen kan også falle mellom den direkte vinkelen til to naboceller. Det er i det siste tilfellet strømmingen deles mellom to celler. Dette skjer da i henhold til størrelsen på vinkelen i strømningsretning i forhold til den direkte vinkelen mellom de to cellene Tarboton [1997].



FIGUR 4.12: Modell som beskriver samlet arbeidsflyt ved å modellere flomveier med åpne og lukkede stikkrenner.

For å identifisere kritiske områder i studieområdet ble flomveier fra scenario med åpne stikkrenner overlagt stengte flomveier. I kartet vil en identifisere hvordan de skiller seg fra hverandre. Det er da mulig å si hvor vannet kan drenere om en stikkrenne er tett. For å finne kritiske områder ble flomveiene sett i sammenheng med registrerte skadepunkt fra flommen i 2013. Det innebærer at en stengt stikkrenne kan ha ført til vann på avveie og ha bidratt til skadepunktet.

4.1.7 *Topographic wetness index*

I denne oppgaven ble TWI brukt å modellere hvordan DEM akkumulerer vann. TWI ble først beskrevet av [Beven and Kirkby \[1979\]](#). For å generere TWI raster må modellen gjennom flere prosesser. TWI beskriver terrengets evne til å akkumulere vann under betingelse av stabil tilstand (steady state). TWI baseres på DEMs helning og vann-tilførende området (*Flow accumulation*). Følgende formel ble benyttet for å generere TWI:

$$\text{TWI} = \text{Ln}(\text{"FLOWACC"} * \mathbf{a}) / \text{Tan}(\text{"SLOPE"})$$

Her er TWI navnet på rasteren som ble avledet der, \mathbf{a} er arealet av hver pixel i m^2 , siden 1 m pixel er benyttet er \mathbf{a} lik $1 \times 1 \text{ m} = 1 \text{ m}^2$, FLOWACC er navnet på *Flow accumulation* raster, og SLOPE er navnet på helnings raster.

Parametre som er avledet fra helning møter utfordringer i flate områder. Likningen ikke kan løses hvis tan (beta) er 0 eller hvis brøken er negativ. Når det ikke er en løsning for logaritmen blir cellene klassifisert som NoData [Reuter et al. \[2009\]](#). Dette problemet kan løses i ArcMap ved å bruke verktøyet *Nibble*. Verktøyet tildeler cellene med NoData verdien til den nærmeste cellen [ESRI \[2014\]](#).

Som beskrevet i metoden over kan vanntilførende område (*Flow accumulation*) genereres ved ulike metoder. Hvilken flytalgoritme som ligger til grunn har påvirkning på TWI rasteret. I dette studiet ble det generert TWI fra *D8* og *D-infinity* algoritmen.

4.1.8 *Fuzzy Logic*

Fuzzy Logic er en metode for å prøve å forstå en hendelse som har komplekse årsakssammenhenger. Tanken bak *Fuzzy Logic* er at utvalgte parametre er medlemmer i en gruppe og medlemskapverdien til parametre beskriver i hvor stor grad i de medlemmer [Pradhan \[2010\]](#). I denne sammenhengen betyr det at medlemskapverdien er uttrykk for potensiell flom-

og jordskredfare i Brandrudsåa.

4.1.8.1 Databehandling

For at de utvalgte parametrene skal kunne tildels en medlemskapverdi, må dataene være kontinuerlige. Parametrene helning, plan-kurvatur, profil-kurvatur og TWI er kontinuerlige.

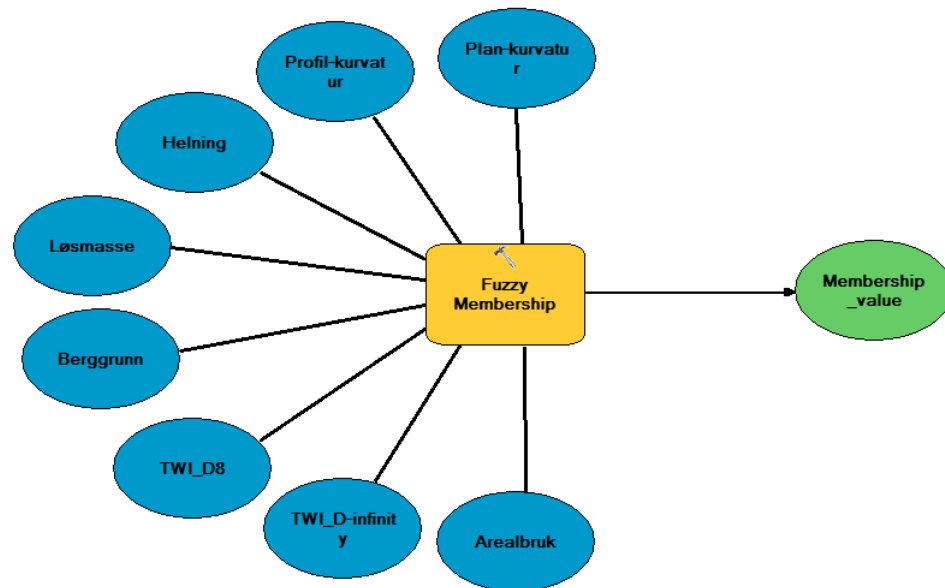
Kategoriske data som arealbruk, løsmasse og berggrunn må preprossesers for å kunne anvendes i en *Fuzzy Logic* analyse. Kartlagene er vektordata og er oppbygd av polygoner som representerer geografisk utstrekkingen til kategoriene. Ved hjelp av verktøyet, Polygon to raster, transformeres dataene til raster. For å kunne gi dataene en verdi som beskriver hvilken innvirkning parametrene potensielt har, er dataene reklassifisert.

Kategoriene i arealbruk ble tildelt verdier mellom 0 og 6, der 6 var den kategorien som potensielt var mest utsatt for skred. Jordbruk ble satt som 6 og snaumark til 5. Skog fikk kategorien 2 og myr 1. Bebyggelse og vann fikk kategorien 0. Kartlagene, løsmasse og berggrunn, ble tildelte verdier basert på antall skred. I NIFS rapporten, Regional varslng av jordskredfare: Analyse av historiske jordskred, flomskred og sørpeskred i Gudbrandsdalen og Ottadalener historiske skredhendelser registrert for Gudbrandsdalen. Antall skred blir i denne oppgaven antatt å være et uttrykk for hvilken type løsmasse og berggrunn som er mest utsatt for skred.

TABELL 4.1: Tabell som viser antall skred. Verdiene er sammenslått av skredtypene utglidning, jordskred, flomskred og uspesifiserte skred i Gudbrandsdalen og Ottadalen [Walberg and Devoli \[2014\]](#) .

Type løsmasse	Frekvens	Type berggrunn	Frekvens
Morene tykt dekke	219	Metasandstein	71
Morene tynt dekke	22	Sandstein	60
Glasifluvial	29	Fyllittisk sandstein	98
Fluvial	39	Sandstein og skifer	14
Torv og myr	1	Dolomitt	19
Bart fjell	3		

4.1.8.2 Medlemskapverdi for parametre



FIGUR 4.13: Modell som viser samtlige parametrene som ble utprøvd. Berggrunn og TWI avledet fra D-INF ble ikke en del av resultatet.

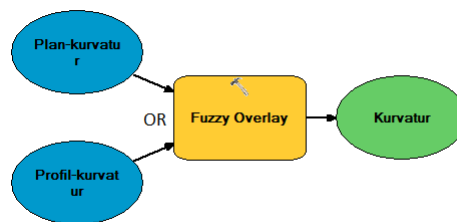
Verktøyet Fuzzy membership transformerer celleverdiene til parametrene til verdier i det lukkede intervallet 0 og 1. Skalaen indikerer styrken til medlemskapet i samlingen og baseres på en spesifisert fuzzyfication algoritme. En celle med verdi 1 tilsier at cellen er fullstendig medlem og 0 er ikke medlem. Valg av medlemskaps type er basert på fordelingen til dataene og hvordan en vurderer at parametrene påvirker problemstillingen Pradhan [2010].

I analysen ble medlemskapverdiene gitt ut i fra MSLarge, MSSmall og Linear. MSLarge og MSSmall anvendes om det er verdiene over eller under gjennomsnittet tilsier at dataene skal ha høy medlemskapverdi. Linear anvendes der en forventer at verdiene har en lineær sammenheng. Parameternes medlemskapverdier blir presentert i kart over Brandrudsåa (se vedlegg).

4.1.8.3 Fuzzy overlagsanalyse

Når medlemskapverdien er avgjort, avgjøres hvilke parametre som skal være deltaker av analysen. Neste steg er å avgjøre hvilken medlemskapfunksjonen som avgjøre verdien cellene i resultatet. I oppgaven ble enkelte parametre lagt sammen i en submodell, slik at de fikk en samlet innvirkning på resultatet.

Topografiske parametre helning, plan- og profil-kurvatur og TWI ble medlemmer av overlagsanalysen. Det ble valgt å utarbeide en submodell for plan- og profil-kurvatur rastrene. Fuzzy OR tildeler høy medlemskapverdi der det er høye verdier i en av medlemskapverdiene. Det vurderes å være mest hensiktsmessig, da både kurvaturen i det horisontale retningen (raviner) og konvekse skråningsform kan føre til utløsningen av skred [Sidle and Ochiai \[2006\]](#).

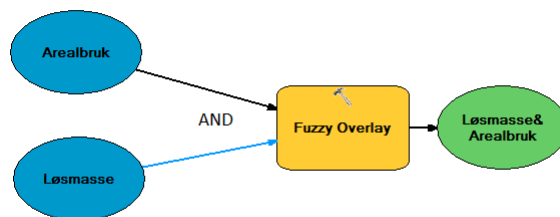


FIGUR 4.14: Submodell som viser plan- og profil-kurvatur sammenslått med medlemskapfunksjonen Fuzzy OR. Resultatet er et raster med høye medlemskapsverdier der som et av parametrene har høy medlemskapverdi.

Helning og TWI er parametre som har stor sammenheng med utløsningen av skred. Helning er en kontrollerende faktor på skred [Akgun et al. \[2012\]](#). I analysen ble medlemskapverdiene for helning ikke videre behandlet. Medlemskapverdiene for TWI påvirker analysen som et eget parameter og valget er basert på den sterke sammenhengen mellom tilførsel av vann og utløsning av flom- og jordskred [Selby et al. \[1982\]](#). TWI avledet fra *D8* algoritmen ble valgt som medlem.

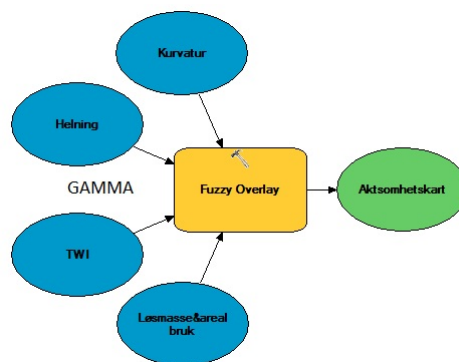
Løsmasse og arealbruk ble satt sammen i en submodell for at de skulle ha en samlet innvirkning. For av tildele medlemskapverdien i submodellen ble medlemskapfunksjonen Fuzzy OR anvendt. Det må være høye verdier i begge parametrene for at det skal bli

høye verdier i resultatet.



FIGUR 4.15: Modell som viser løsmasse og arealbruk som submodell. Fuzzy AND ble anvendt for å identifisere celler som har høy medlemskapverdi i både arealbruk og løsmasse. Resultatet er en submodell med høy medlemskapverdi dersom begge kartlagene har det.

For å avgjøre medlemskapfunksjonene til aktsomhetskartet med parametre og submodeller ble medlemskapfunksjonen Fuzzy GAMMA. Basert på litteratur ble $\lambda(0.9)$ valgt Lee [2007].



FIGUR 4.16: Modeller som viser hvordan aktsomhetskartet ble generert. Helning og TWI ble vurdert som parametre som skal innvirke alene. Kurvatur og Løsmasse og arealbruk ble implementert. Medlemskapfunksjonen som avgjorde verdiene til cellene i resultatet ble avgjort med Fuzzy GAMMA $\lambda(0.9)$

Det ble utarbeidet et raster med medlemskapverdi for berggrunn. Parametre ble vurdert å kun indirekte påvirker utløsningen av skred i området. Det ble valgt å ikke ha med berggrunn i aktsomhetskartet.

Kapittel 5

Resultater

5.1 Resultater

Kapittelet inneholder resultatet fra tre temaer. Den første delen er valg av DEM og basert på resultatet fra RMSE analysen. Deretter følger resultatene fra hydrologiske analyser. Resultatene beskriver flytalgortimene og TWI i Brandrudsåa. Etterfulgt av en gjennomgang av områder som er vurdert som sårbare i forhold til vann på avveie. Den siste delen av resultatkapittelet er viet til *Fuzzy logic*. Resultatene er både basert på valg av metoder og resultatet fra aktsomhetsanalysen.

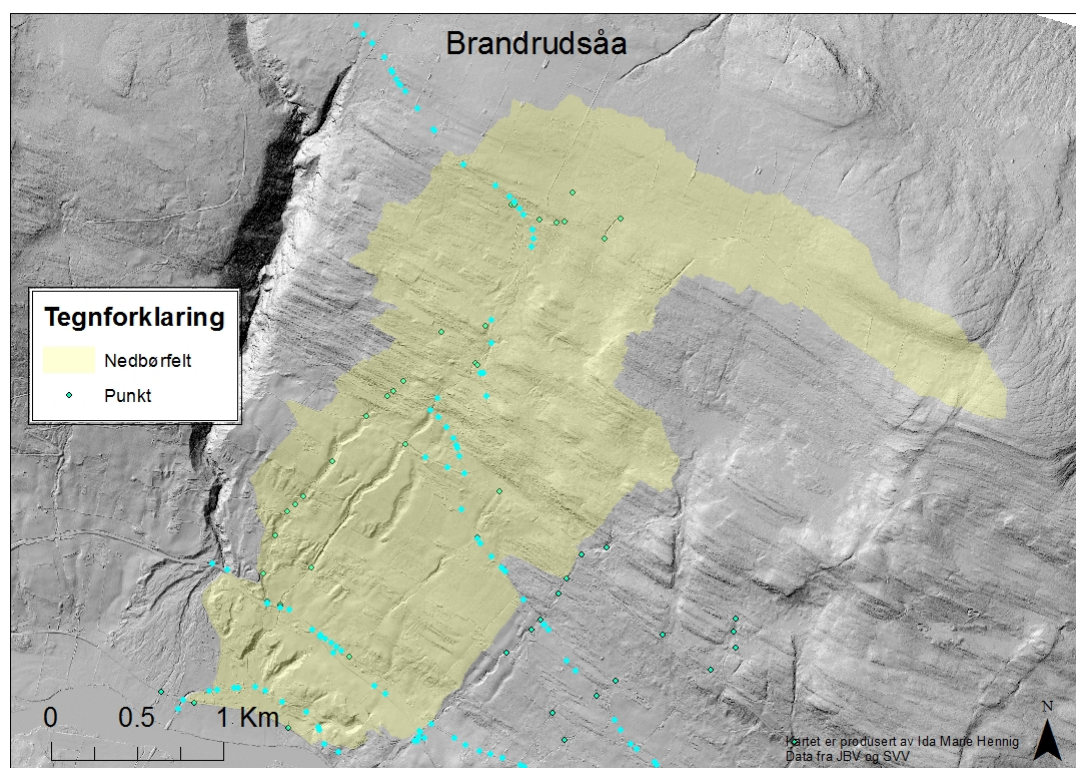
5.1.1 Valg av DEM

Nøyaktigheten til den vertikale høyden til terrengmodellene er vurdert ut i fra *Root mean square error* (RMSE). Modellen med lavest RMSE er *Maximum* uten modifisering av stikkrenne (2.051 m). *IDW* og *Nearest neighbour* (NN) gir nest best resultat. Nøyaktigheten er å regne for innenfor en akseptert grense [Oh and Pradhan \[2011\]](#).

De 4 øverste DEM skiller seg fra de andre, med et betydelig høyere avvik fra kontrollpunktene. De 4 øverste modellene er generert via *Terrain*. Prosessen har ført til at avstanden mellom cellene og kontrollpunktene er nesten dobbel så høy (NN med stikkrenne 4.305m). Tabellen viser at *Maximum*, *IDW* og *Nearest neighbour* er metoder som sammenliknet med resten av modellene gir en lavere RMSE.

TABELL 5.1: Tabellen viser gjennomsnittlig avvik fra målte terrengdata \pm SD, og RMSE for 14 terrengmodeller. Utgangspunktet for alle modellen er det samme LAS-dataset. Laveste RMSE ble funnet for metoden Maximum (uten modifiering) av stikkrenne (2.051 m).

Root-mean-square error (RMSE) for digital elevation model (DEM) (m)				
Type	Interpolering	mean	\pm SD	RMSE
Terrain	Natural neighbour uten stikkrenner	0.714	4.03	4.099
Terrain	Natural neighbour med stikkrenner	1.189	4.14	4.305
Terrain	Linear uten stikkrenner	0.916	3.27	3.395
Terrain	Linear med stikkrenner	1.255	3.19	3.426
LiDAR	Average uten stikkrenner	1.414	2.01	2.455
LiDAR	Average med stikkrenner	0.984	1.83	2.081
LiDAR	IDW uten stikkrenne	1.007	1.80	2.066
LiDAR	IDW med stikkrenne	1.436	1.98	2.443
LiDAR	Maximum uten stikkrenne	0.978	1.80	2.051 *
LiDAR	Maximum med stikkrenner	1.393	1.96	2.409
LiDAR	Minimum uten stikkrenne	1.036	1.99	2.080
LiDAR	Minimum med stikkrenne	1.480	1.99	2.477
LiDAR	Nearest neighbour uten stikkrenne	1.007	1.81	2.068
LiDAR	Nearest neighbour med stikkrenne	1.441	1.98	2.449



FIGUR 5.1: Kart som viser punktene som RMSE er regnet ut fra. Lyseblå punkter er punktene fra som inneholder høydeverdier, grønne punkter er ikke anvendt i RMSE da de ikke inneholder informasjon om høyde. Kartet viser at punktene er spred over hele modellen, men er i forbindelse med fylkesveiene og E6.

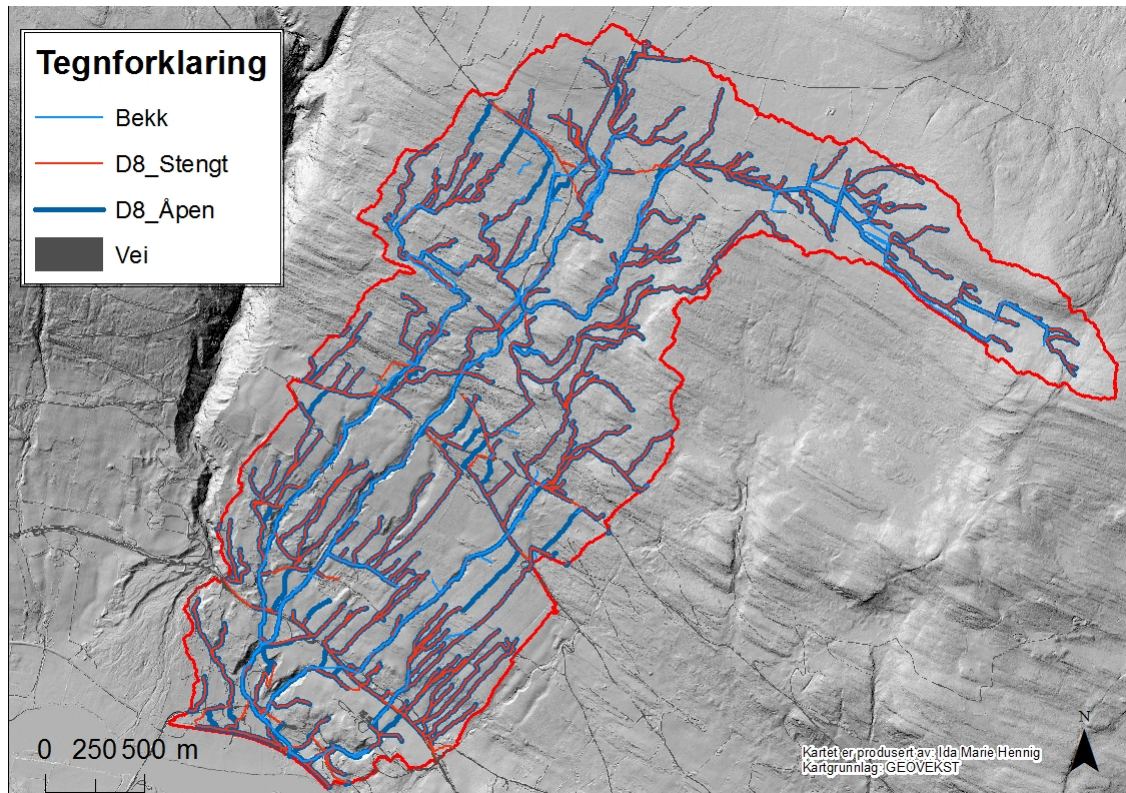
Kontrollpunktene er målt inn med totalstasjon av Statens Vegvesen og hentet fra datafilen med stedfestet stikkrenne og kulverter over Brandrudsåa. Nøyaktigheten til disse punktene vurderes som svært god, dersom utstyret er blitt korrekt anvendt av operatøren Skogseth and Wangen [1998].

5.1.2 Modellering av flomveier

Flomveianalyser utarbeidet med to forskjellige flytalgoritmer og blir presentert først i en oversikt over hele studieområdet. Videre presenteres 4 områder som vurderes ut i fra analysene som kritiske områder. Det er i tillegg sammenlikning av flytalgitrmene og i tilfelle er det avdekket at *D-Infinity* kan være mer hensiktsmessig å benytte. Kritiske områder er validert ut i fra registrerte skadepunkt fra flommen i 2013. Det presenteres TWI for området avledet fra *D8* og *D-Infinity*.

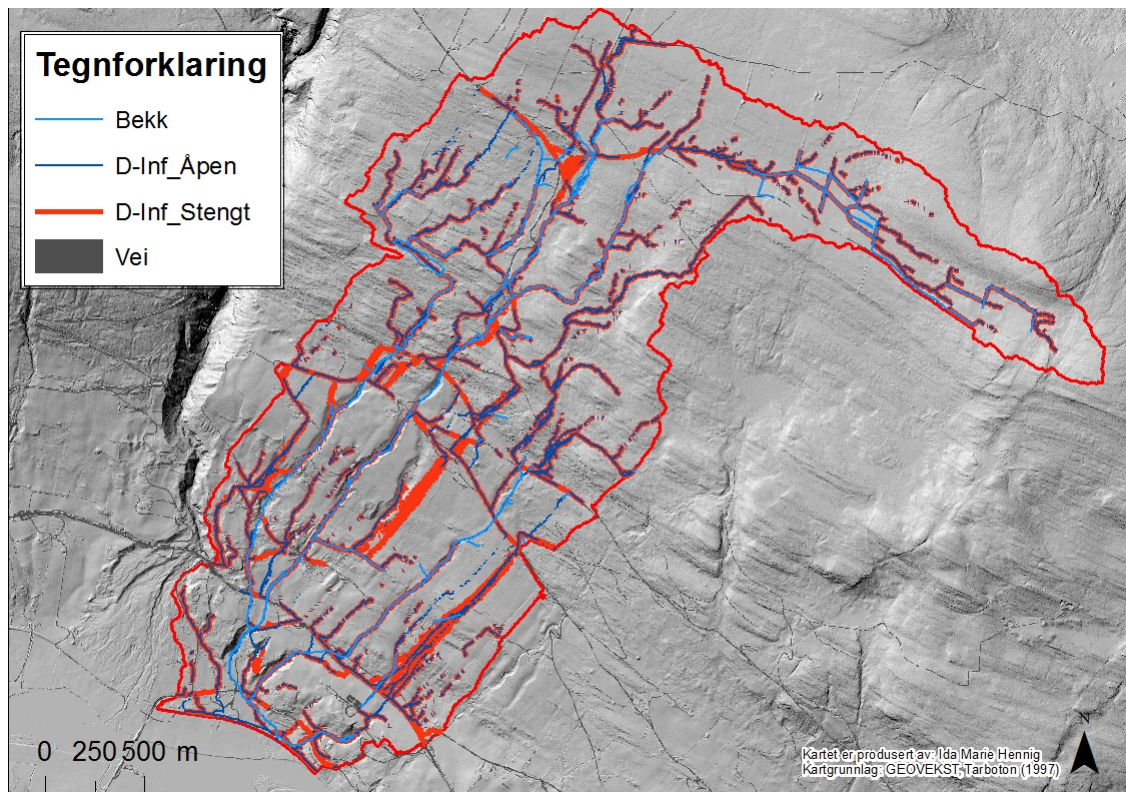
5.1.2.1 Algoritmer

Figur 5.2 viser et oversiktskart over Brandrudsåa med flomveier er avledet fra *D8* algoritmen. Terskelverdi satt til 10 000 celler, det vil at 10 000 celler må drenere til en celle for at den skal vises som en flomvei. Blå flomveier representerer at vannet drenerer stikkrenner og kulverter. Rød flomvei viser hvor vannet vil drenere om stikkrenner og kulverter er stengt. Ved å legge oppmerksomheten øverst til venstre i kartet, ser en at om stikkrennene i Kvarvvegen er åpne, vil vannet drenere nedover i feltet. Om stikkrenne er blokkerte eller har for liten kapasitet vil vannet drenere i grøften. Men som kartet viser vil det ved stengte stikkrenner føre til at det er et stort område som drenerer til den delen av nedbørfeltet. Eksempelet representerer trenden i resten av Brandrudåa. Dersom stikkrennene ikke fungerer optimalt, vil vannet drenere langs veien.



FIGUR 5.2: Kart som viser D-INF algoritmen i Brandrudsåa

Figur 5.3 viser D-infinity algoritmens modellerte flomveier i Brandrudsåa. Terskelverdien er satt til 5000. Kartet viser ved rød flomveier ved stengte stikkrenner og blå er åpne.

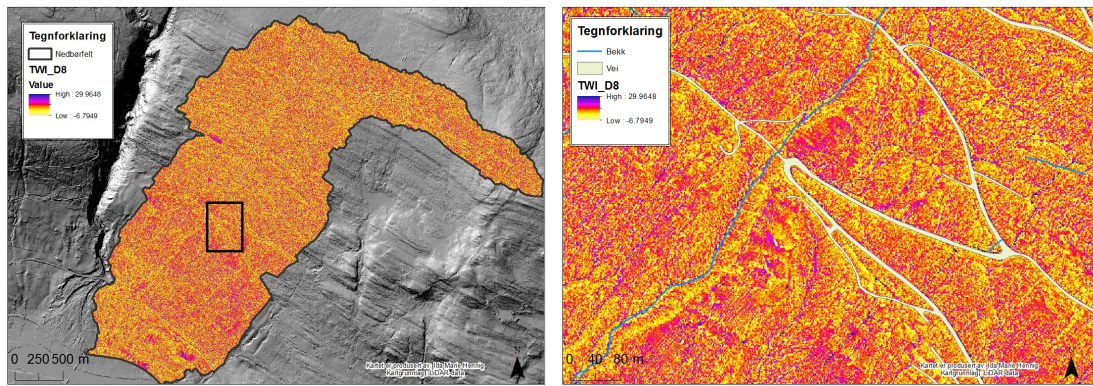


FIGUR 5.3: Kart som viser D-infinty algoritmen ved blokkerte stikkrenner. Legg merke til hvordan vannet kan drenere til flere celler noe som viser at vannet sprer seg rundt en høyde.

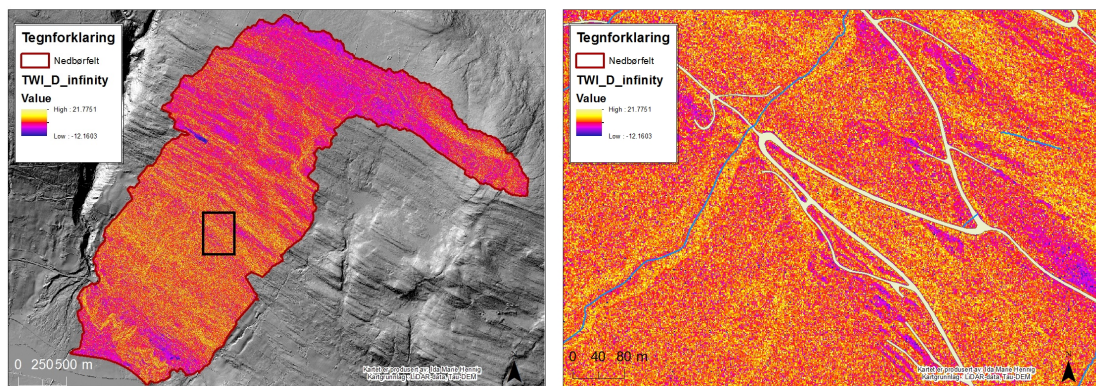
Sammenlikningen av algoritmene i Brandrudsåa viser at begge algoritmene modellerer flomveier i samme område. D-INF viser strømminger til flere celler og resultatet blir at flomveiene sprer seg.

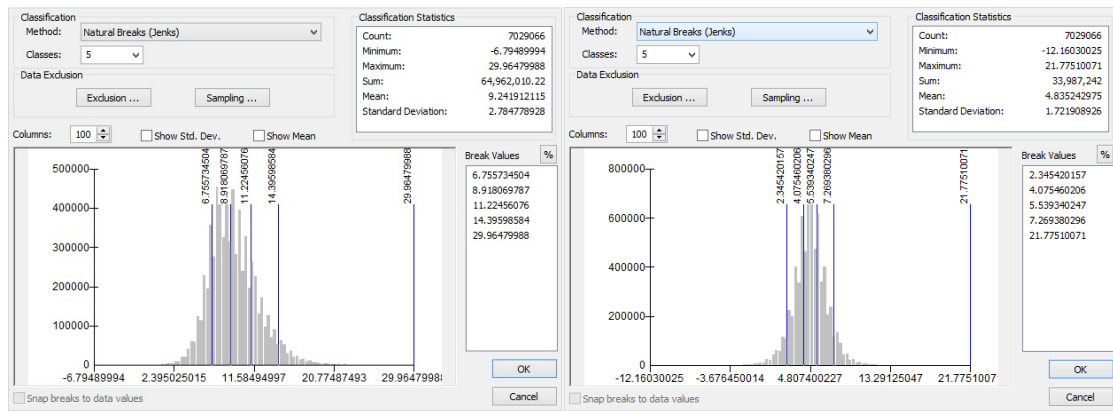
5.1.2.2 TWI

Kartet (5.4) fra *D8* flyt algoritme viser (A) et oversikts kartet over Brandrudsåa. Generelt kan en si at er høyere akkumulering av vann i slake og flate områder. Fra utsnittet (B) kan en oppdage mønstrene som kan sammenliknes med *D8* flomveianalyse.

(A) *D8* algoritmen.(B) *D-Infinity* algoritmen.FIGUR 5.4: TWI generert fra *D8* algoritmen.

Kartet (5.5) fra *D-Infinity* flyt algoritme viser (A) et oversikts kartet over Brandrudsåa. Generelt kan en si at er høyere akkumulering av vann i slake og flate områder. Fra utsnittet (B) kan en oppdage mønstrene som kan sammenliknes med *D8* flomveianalysene. Skråninger av lav akkumulering og forsenkinger har høy akkumulering.

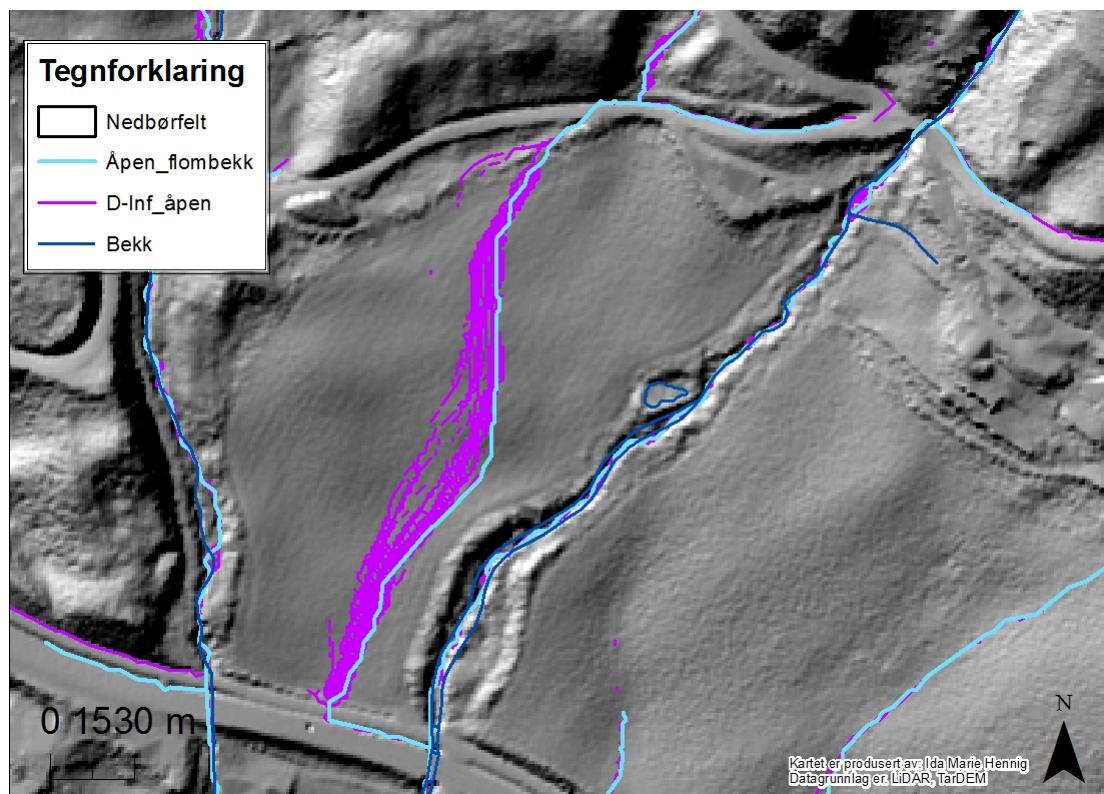
(A) *D8* algoritmen.(B) *D-Infinity* algoritmen.FIGUR 5.5: TWI generert fra *D-Infinity*

(A) *D8* algoritmen.(B) *D-Infinity* algoritmen.

FIGUR 5.6: Histogram som viser spredningen på verdiene i TWI rasterene. (A) *D8* algoritmen resulterer i en TWI som har gjennomsnittsverdi 9,24 og standardavviket er 2,78. (B) *D-Infinity* algoritmen resulterer i en TWI som har lavere gjennomsnittsverdi enn *D8*, 4,83. Standardavviket er lavere med 1,72 (skjermbilde fra ArcMap)

5.1.2.3 Validering

Validere resultatene av flomvei analysene kan gjøres ved å visuelt vurdere modellerte flomveier sammenfaller med bekker som eksisterer i virkeligheten. FKB-data er detaljerte grunnlagsdata og benyttes til formålet. I Brandrudsåa sammenfaller både *D8* og *D-Infinity* med FKB-data i hele området. Figur 5.7 viser et utsnitt av eksisterende bekker Trilla og Brandrudsåa.

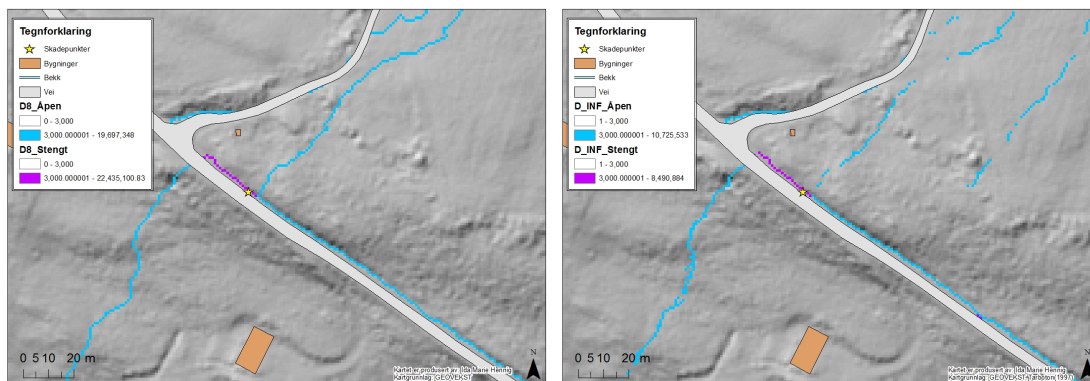


FIGUR 5.7: Kart som viser at eksisterende elv og vanntilførende område (Flow accumulation) sammenfaller både for $D8$ og D -Infinity. Dette kan være en god indikator på at metoden modellerer flomveier som representerer virkeligheten.

Det er i tillegg mulig å validere resultatene ved å sammenlikne flomvei analysene mot registrerte skadepunkt. I Brandrudsåa ble det indentifisert 4 områder som kan være kritiske med tanke på drenering og vann på avveie.

5.1.2.4 Sårbare områder og infrastruktur

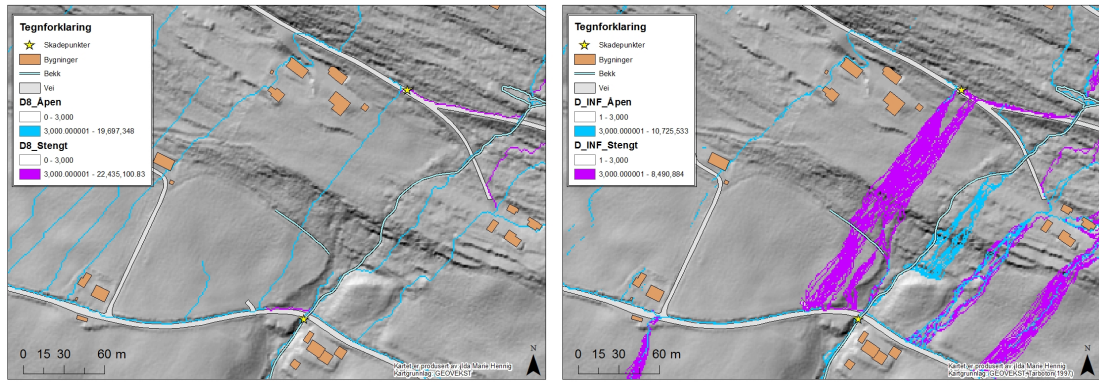
Område 1, Kvarvvegen, er lokalisert helt øverst i studieområdet. Figur 5.8 viser hvordan $D8$ og D -Infinity modellerer drenering ved åpen stikkrenne. Blå flomvei viser at vannet vil drenere under veien. Dersom den øverste stikkrenna er blokkert kan store mengder vann drenere langs grøften og kan føre til potensielt mer vann enn grøften er designet for å lede.

(A) $D8$ algoritmen.(B) D -Infinity algoritmen.

FIGUR 5.8: Sammenlikning av D -Infinity og $D8$ algoritmen i område 1, Kvarvvegen. Terskelverdi for akkumulering er satt til 3000 celler i begge fremstillingene. Lilla strøm viser hvordan vannet ville ha drenert dersom stikkrennen (der det blå vannet renner igjennom) hadde vært helt blokkert. Noe som kunne ha ført til skadepunktet (kraftig erosjon i grøften). Begge metodene klarer å vise hvordan den øverste stikkrennen kan være et kritisk punkt.

Område 2, Dalseggvegen er lokalisert midt i Brandrudsåa. Figur 5.9 viser modellerte flomveier med $D8$ og D -Infinity. Området kan være et eksempel på hvordan en blokkert stikkrenne kan utføre store skader. Det første kritiske punktet er stikkrenna ved den øverste veien, som skal lede bekken Trilla videre ned i studieområdet. Her viser lilla strømning hvordan vannet drenerer videre langs veien og kan ha vært årsaken til registrert skadepunkt. Ved skadepunktet modellerte de to algoritmene at vannet drenerer over veien, ned på jordet og ned langs Dalseggvegen. Selv ved kun en blokkert stikkrenne kan mengden vannet som drenerer langs Dalseggvegen bli stor. Situasjonen kan bli betraktelig verre dersom stikkrennene som leder vannet under Dalseggvegen også skulle være blokkert eller ha for liten kapasitet. Dalseggvegen hadde store erosjons relaterte skader etter flommen 2013.

Sammenlikningen av flytalgoritmene viser at begge metodene modellerer strømning i samme området. D -Infinity har en divergerende strømning ned på jordet, mens $D8$ modellerer kun en flomvei.

(A) *D8* algoritmen.(B) *D-Infinity* algoritmen.

FIGUR 5.9: Sammenlikning av *D-Infinity* og *D8* algoritmen i område 2, Dalseggvegen. Terskelverdi for akkumulering er satt til 3000 celler i begge fremstillingene. Kartet viser at det er svært viktig å ha tilstrekkelig dimensjonering i den naturlige vannveien, da en blokkering av disse kan føre store vannmasser på avveie. flomvei analysene viser at vann på avveie kan ha ført til registrert skadepunkt.

Analysen kan delvis valideres med Ortofoto fra flommen 2013. Bildet (5.10) viser bekken Trilla. Pilen markerer erosjon på jorden.

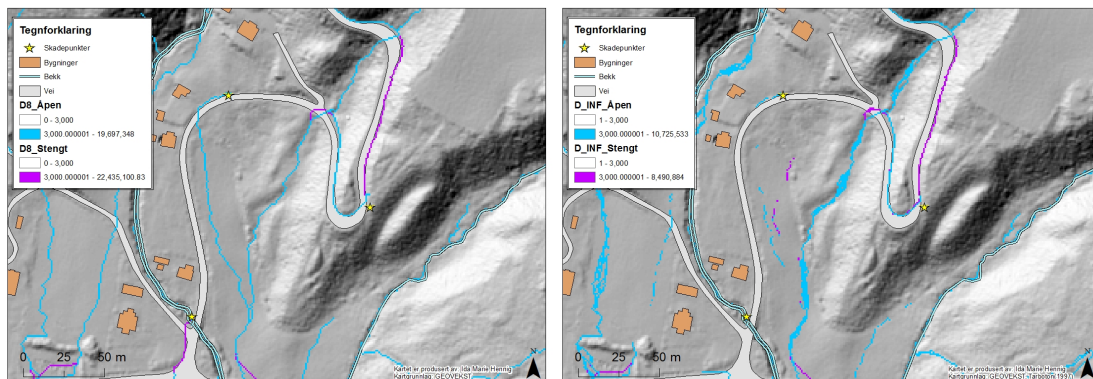


FIGUR 5.10: Ortofoto som bekrefter akkumulering av vann på jorde i område 2. Svart pil viser tegn på erosjon som kan være relatert til vann på avveie. Bilde er tatt 07.06.2013 (GEOVEKST)

Området 3, Ysterivegen, er lokalisert nedstrøms for E6, mot Gudbrandsdalslågen. Selv om analysene viser at det akkumuleres vann ved første skadepunktet (5.11) mest sannsynlig et resultat av avrenning fra skråningen, kan en blokkert stikkrenne kan ha ført til mer vann enn naturlig på oversiden av veien. Dette kan ha vært en medvirkende årsak

til skadeomfanget.

Ved å sammenlikne strømmingen ved andre stikkrenne kan en se en forskjell ved algoritmene. *D8* modellerer at det akkumuleres vann (terskelverdi 3000) ved skadepunktet. Vannet drenerer over veien og ned på jorden.



(A) *D8* algoritmen.

(B) *D-Infinity* algoritmen.

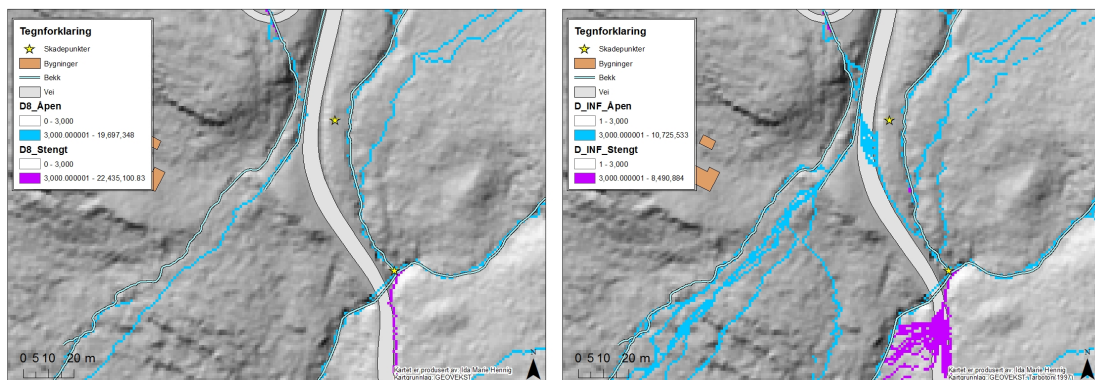
FIGUR 5.11: Sammenlikning av *D-Infinity* og *D8* algoritmen i området 3, Ysterivegen. Terskelverdi for akkumulering er satt til 3000 celler i begge fremstillingene. Det fremkommer av begge metodene at vannet (lilla strøm) kunne ha forårsaket det første skadepunktet. Dette ved at vannet har drenert gjennom den øverste stikkrenna

Ortofoto (5.12) av jorden tatt etter flommen viser et stort skadeomfang. Vannet som forårsaket skadene på jorden er mest sannsynlig ikke fanget opp i flomveianalysene, men modellerte flomveier kan ha vært en medvirkende årsak.



FIGUR 5.12: Ortofoto som viser store skader i område 3. Gul stjerne viser samme skadepunkt (ved bekken) i kartet over område (3). Bilde er tatt 25.05.2013 (GEOVEKST)

Område(4), Midtre del av Kvarvvegen (figur 5.13), viser at *D-Infinity* algoritmen kan modellere øverste skadepunkt. Punktet er registrert som: *Kraftig spor etter erosjon langs grøft*. Modelleringen er uavhengig av åpne/lukkede stikkrenner, da blå flomvei viser situasjonen der stikkrenner fungerer optimalt. Nederste skadepunkt er lokalisert i en eksisterende bekk. Ved blokkert stikkrenne i dette området vil vannet drenere langs veien. *D-Infinity* viser vannet ikke drenerer kun i grøften (på østsiden) men over veien og ned i bekken.



(A) *D8* algoritmen.

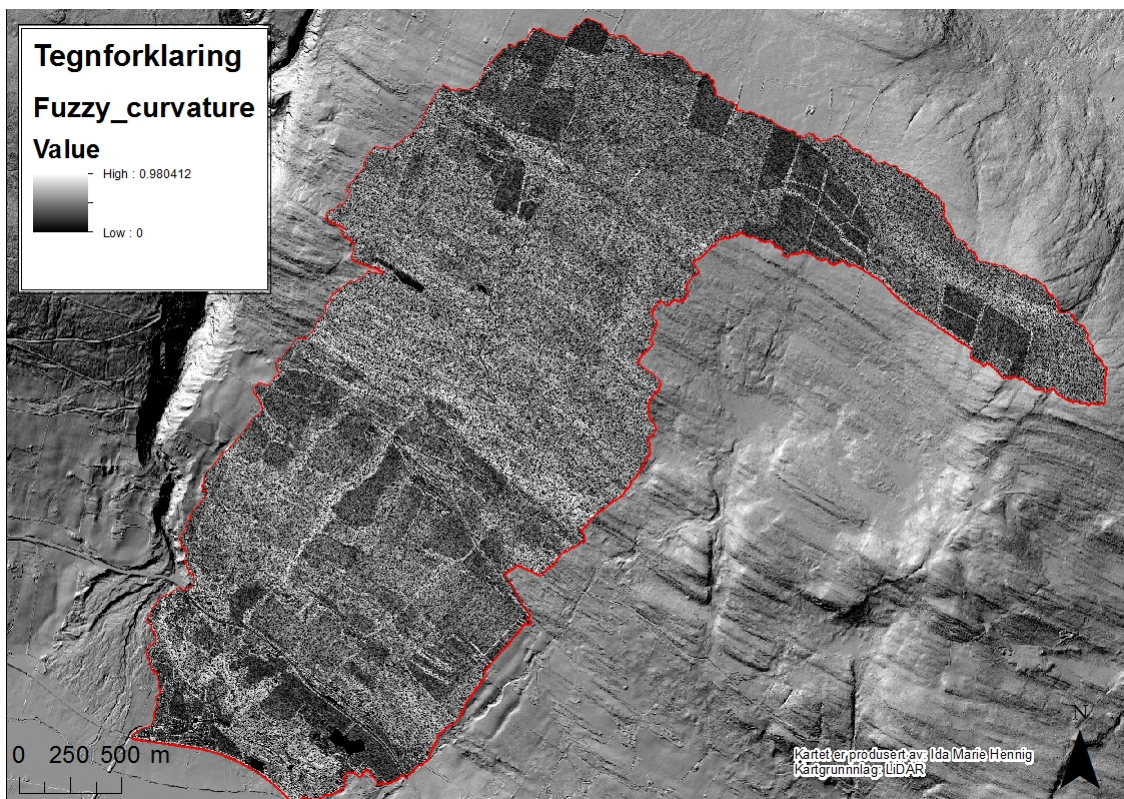
(B) *D-Infinity* algoritmen.

FIGUR 5.13: Sammenlikning av *D-Infinity* og *D8* algoritmen i område 4, Midtre Kvarvvegen. Terskelverdi for akkumulering er satt til 3000 celler i begge fremstillingene. Øverste skadepunkt modellerer *D-Infinity* algoritmen at vannet drenerer over veien. *D8* algoritmen modellerer at vannet kun drenerer på vestsiden av veien.

5.1.3 Fuzzy logic

5.1.3.1 Valg av parametre og submodeller

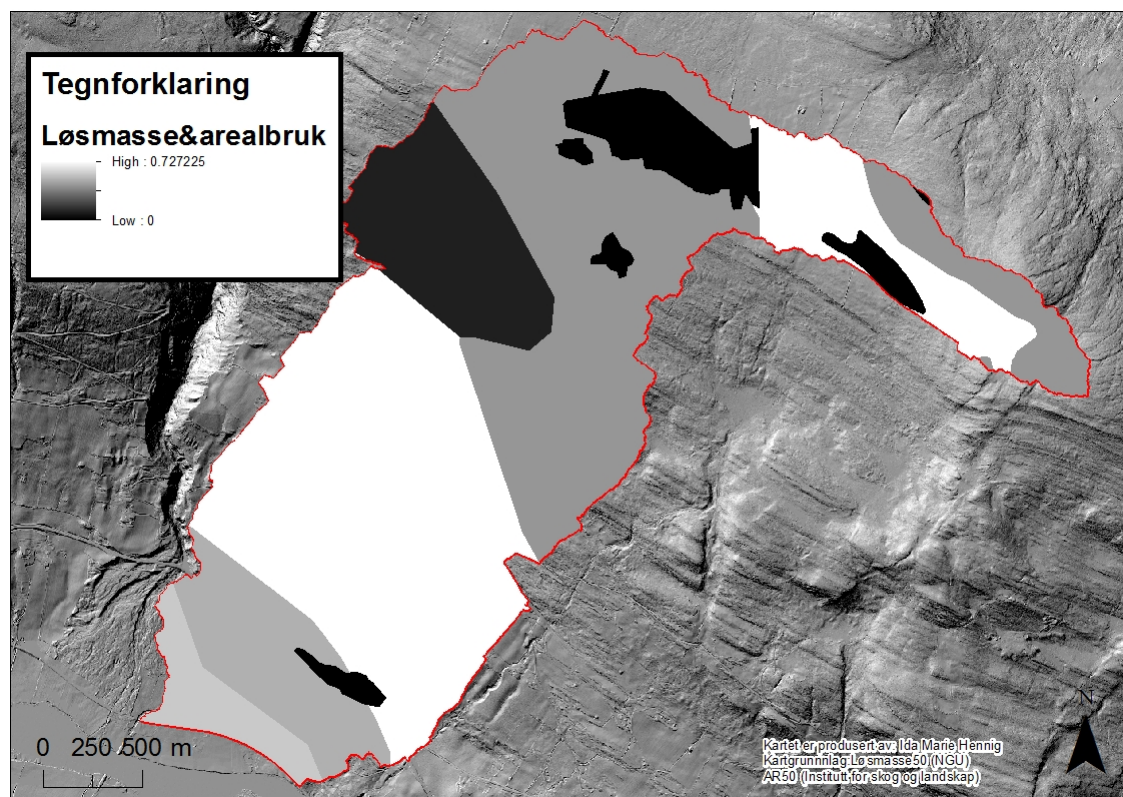
Av de topografiske parametrene ble helning og TWI ble anvendt i aktsomhetskartet slik de ble generert med medlemskapverdien. Plan- og profil-kurvaturen ble satt sammen til en submodell. Submodellen har en samler påvirkningen plan- og profil-kurvatur har på aktsomhetskartet. Som figur 5.14 viser har forsenkninger og konvekse skråninger fått høy medlemskapverdi. Vann og flate områder har fått lav medlemskapverdi. Fuzzy AND gir høy verdi til submodellen dersom det er høye verdier i et av kartlagene den er satt sammen av.



FIGUR 5.14: Kart som viser medlemskapverdiene til submodellen kurvatur utarbeidet med medlemskapfunksjonen Fuzzy AND. Lyse celler representerer områder som har høy medlemskapverdi. Kartet viser at det oppstår i skråninger som er konvekse og raviner/forsenkinger. Flate områder er representert ved svarte celler og viser områder som det ikke er knyttet til fare for utløsning av skred.

Vegetasjon påvirker løsmasser ved å mekanisk forsterke løsmassene. Løsmasse og arealbruk ble satt sammen i submodell. Medlemskapfunksjonen Fuzzy OR må ha høye verdier i alle kartlag for å oppnå høy medlemskapverdi. Medlemskapverdien ble høy der både

arealbruken og type løsmasse ble vurdert som utløsende for flom- og jordskred. Figur 5.15 viser at områdene midt i kartet har fått høy medlemskapverdi. Det er områder med morene med høy mektighet og jordbruk. Områder med lavest medlemskapverdi er myr, vann, bebygde områder og vegeterte områder. Berggrunn ble ikke en del av endelig resultatet. Parametre ble vurdert å ha en indirekte påvirkning av skred da området er i hovedsak dekket av løsmasser.

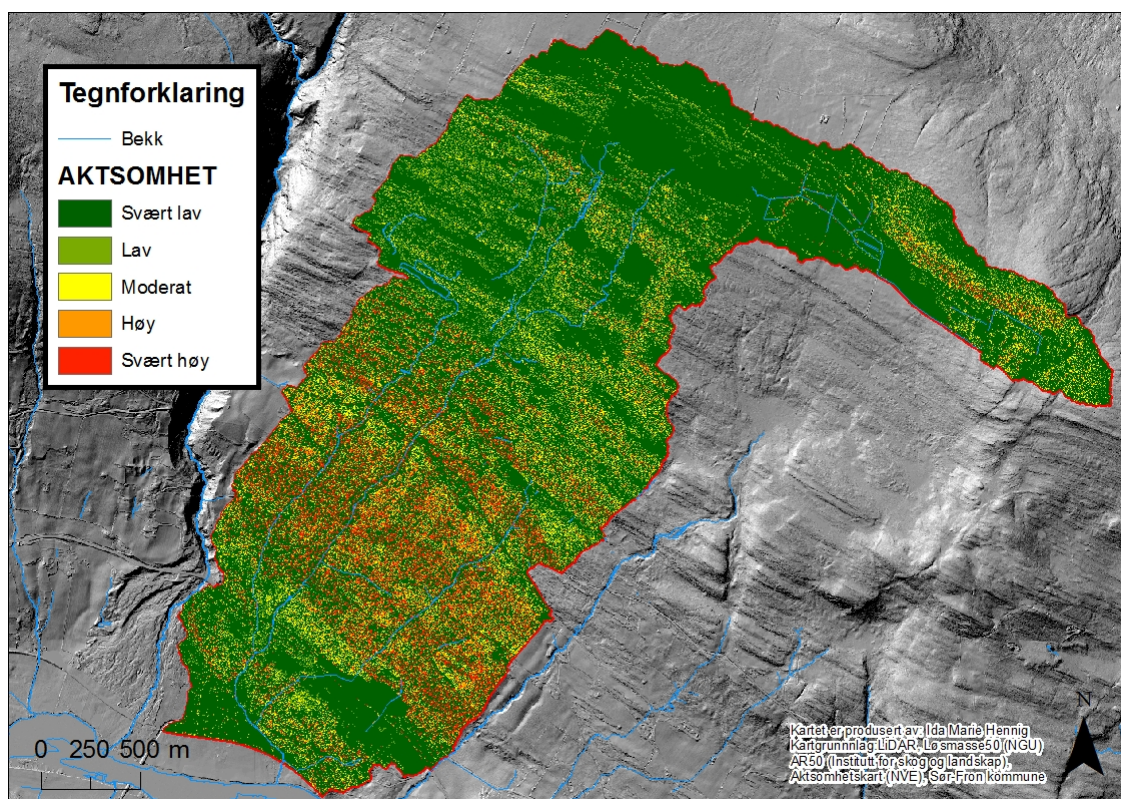


FIGUR 5.15: Kart som viser medlemskapverdiene til submodell løsmasse og arealbruk utarbeidet med medlemskapfunksjon Fuzzy OR. I kartet er celler som er representert med hvitt områder som har høy medlemskapverdi i begge kartlagene. Det innebærer at det må være en løsmasse kategori og arealbruk som tilsier at området er potensielt utsatt for utløsingen av flom- og jordskred. I kartet ser en at områder som er kartlagt med bart fjell og skog har blitt tildelt lave medlemskapverdier. Andre områder som har lav medlemskapverdi er morene med liten mektighet, myr, bebyggelse, vann og skog. Høyest medlemskapverdi har områder som har morene med stor mektighet og jordbruk. Områder representeres i kartet med hvite celler.

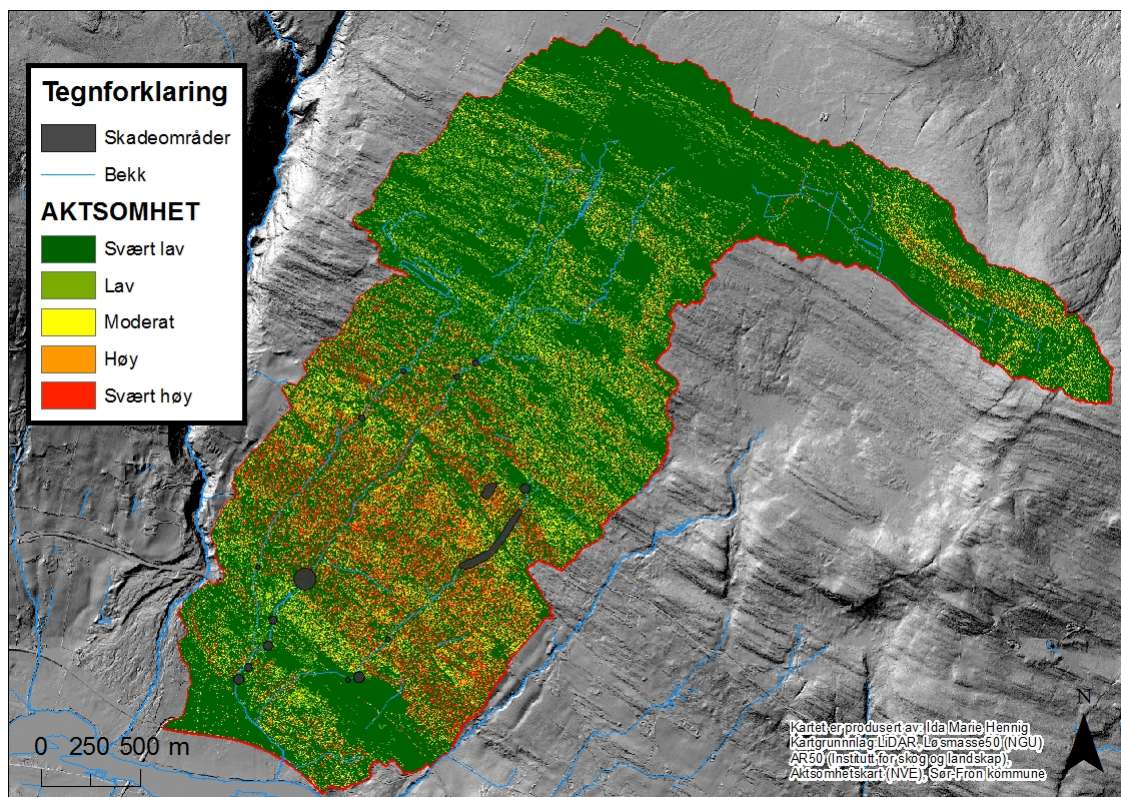
5.1.3.2 Områder i Brandrudsåa som potensielt er utsatt for flom- og jordskred

Aktsomhetskartene som ble utarbeidet i denne masteroppgaven viser avgrensninger som kan være mer utsatte for flom- og jordskredhendelser i studieområdet.

Figur 5.16 viser resultatet av *Fuzzy logic* overlagsanalysen. Kartene er inndelt i 5 aktsomhetsgrader. Inndelingen av aktsomhetsklassene er ideografisk og er inndelt i sekvenser basert på en indre logikk. Kvantil inndeling med (5 klasser) viser 20% av den laveste og høyeste av fordelingen Rød [2009]. Aktsomhetskartet viser områder som kan være utsatt for skred gradert fra lav fare. Det er særlig midtre del av Brandrudsåa som skiller seg ut. Parametrene som analysen bygger på tilsier at det er høyes potensial for utløsningen av skred i dette området og andre bratte skråninger med løsmasser. Et område en bør merke seg er ravinene nedstrøms for E6 (nederst i studieområdet)

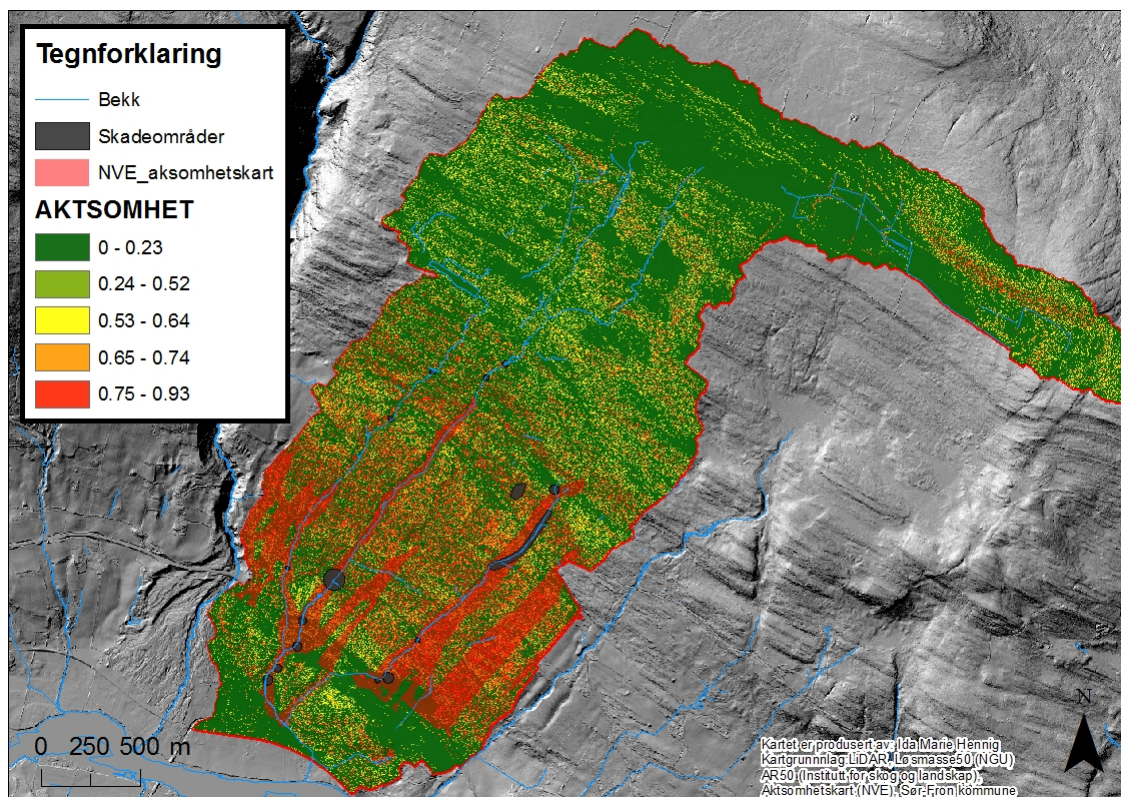


FIGUR 5.16: Aktsomhetskart som viser med rødt områder som er utsatt for skred ut i fra parametre som helning, kurvatur, TWI, løsmasse og arealbruk. Kartet har blitt til ved brukt at *Fuzzy logic* som metode og gamma $\lambda(0.9)$ som medlemskapfunksjon. I kartet kommer det frem at områder som potensielt kan utløse skred er hovedsaklig lokalisert midt i feltet og ved ravinene nede i Brandrudsåa.



FIGUR 5.17: Aktsomhetskart som viser med rødt områder som er utsatt for skred ut i fra parametre som helning, kurvatur, TWI, løsmasse og arealbruk. Kartet har blitt til ved bruk av *Fuzzy logic* som metode og denne fremstillingen har gamma 0.9 som medlemskapsfunksjon. I kartet kommer det frem at områder som potensielt kan utløse skred er lokalisert midt i feltet og ved ravinene nede i Brandrudsåa.

Selv om *Fuzzy logic* overlagsanalyse og NVEs aktsomhetskart ikke er direkte kompatible, er det interessant å sammenlikne de to metodene. Det som særlig skiller de to analysene er at NVEs faresoner har mindre utspreddning og ligger lokalisert rundt de større bekkene.



FIGUR 5.18: Aksomhetskart som viser med røde polygoner NVEs potensielle områder for utløsningen av skred vist med rødt. Svarte polygoner viser skadeområder fra flommen 2013. Kartlagene er lagt over resultatet fra *Fuzzy logic* overslaganalyse.

Kapittel 6

Diskusjon

6.1 Digital terrengmodell

6.1.1 RMSE

I RMSE analysen av DEM ble det avdekket relativt store forskjeller mellom metodene som ble anvendt. I error analysen ble RMSE, standardavvik og gjennomsnittlig avvik for 14 forskjellige DEM kalkulert fra 167 GPS-punkter fra studieområde (kontrollpunkt).

Kontrollpunktene er fordelt over store deler av studieområdet (se figur 5.1), men punktene er målt i tilknytting til de større veiene. Dette kan føre til at RMSE ikke gir et fullstendig bilde av hele studieområdet noe som er særlig aktuelt i områder med vegetasjon. Det kan ha ført til at RMSE ikke er representativ for hele DEM. Hydrologiske analyser som er utført er særlig kritiske områder i kontakt med infrastruktur. Kontrollpunktene er vurdert som anvendbare i denne sammenhengen.

Av de 14 DEM som det er utført RMSE analyse av, er syv ulike metoder utforsket og hver metode har to versjoner. En versjon med nedsenket stikkrenne og en uten stikkrenner. Argumentet for å gjøre det slik er manglende opplysninger om hvordan kontrollpunktene ble målt inn. Om kontrollpunktene ble målt på innsiden av innløp eller utløp til stikkrennene, var tanken at det kunne være vanskelig å få samme høyde punktene fra LiDAR punktene. LiDAR punktene vil ikke kunne måle nøyaktig om det er noe som blokkerer. I RMSE analysen var alle, med unntak av en DEM, lavest RMSE når DEM

var umodifisert. Videre diskusjon baseres på RMSE av umodifiserte DEM.

Størst differanse på RMSE er mellom metoden *Terrain* og *LAS to raster*. Av metodene som ble utført, ble det funnet en differanse på 2.048 m mellom høyeste og laveste resultat.

Det kan være flere årsaker til differensen i RMSE mellom de to metodene. En av årsakene kan være at i *Terrain* blir vei representert som polygoner fra FKB implementert som ”hard breaklines”. Feilkilden kan ha opphav i forskjellige vertikale datum. Dette kan skjer dersom koordinathøyden som er gitt fra FKB-data og GPS punktene ikke er kompatible. Det kan føre til høy vertikal differanse mellom metodene. I tillegg er det oppdaget relativt store forskjeller mellom interpoleringsteknikkene *Natural neighbour* og *Linear* (0.704 m). *Linear* har lavest RMSE (3.395 m). Differensen settes kan ha sammenheng med hvordan de ulike interpoleringsteknikkene avgjør høydeverdiene i nodene. *Terrain* er i følge Fremtidens byer egnet å bruke ved hydrologiske analyser av flomveier, men særlig der punkttettheten ikke er tilstrekkelig [Fremtidens-byer \[2010\]](#). På bakgrunn av resultatet fra RMSE analysen ble det valgt å ikke anvende FKB-data og *Terrain* for utarbeidelse av DEM. Implementering av FKB-data for vei var ikke nødvendig for å kunne modellere flomveier i Brandrudsåa, da punkttettheten er tilstrekkelig for formålet.

LAS to raster gir en innbyrdes differanse på 0,404 m mellom høyeste og laveste resultat. Det betyr at metoden generer en DEM som representerer terrenget mer tilnærmet til høydeverdier fra terrenget i Brandrudsåa. Analysene i oppgaven er basert på DEM med lavest RMSE.

Algoritmer og interpoleringsmetoder produserer høyere nøyaktighet når DEM har en høy oppløsning og indikerer at den romlige oppløsning påvirker nøyaktigheten mer enn valg av interpolering [Bater and Coops \[2009\]](#). I oppgaven ble den romlige oppløsningen på 1x1 m vurdert som innenfor anbefalt grense. Cellestørrelsen bør baseres på punkttettheten og fordelingen av punktene, da terrengets kompleksitet er en viktig faktor [Hengl \[2006\]](#). Generelt kan det konkluderes med at hvilken metode en velger å benytte for å avgjøre celleverdien har en påvirkning i høydeverdien til DEM.

Teoretisk nøyaktighet ved LiDAR er 0.15–1 m i det vertikale planet og 1 m i det horisontale planet [Wilson \[2012a\]](#). Valg av oppløsning kan ha innvirket nøyaktigheten til punktene. Alle 14 DEM har en lavere vertikal nøyaktighet enn hva en teoretisk kan forvente av LiDAR data. Mangel på metadata og usikkerhet vedrørende målemetoder gjør det vanskelig å fastslå nøyaktigheten til kontrollpunktene. Selv om totalstasjon er å regne som en nøyaktig målemetode, kan det ha oppstått feil ved måling fra operatøren sin side, eller ved kalibrering av instrumentet. Det er alltid en usikkerhet der en ikke har fullstendig informasjon om målemetode og rutiner. Men det allikevel grunn til å tro at RMSE mellom DEM og kontrollpunktene kan brukes til å sammenlikne metodene for generering av DEM, da de måles opp mot de samme kontrollpunktene. Sett i sammenheng med usikkerhetene rundt kontrollpunktene vurderes den vertikale nøyaktigheten til DEM kun som delvis avdekket.

6.2 Modellering av flomveier og identifisering av sårbareområder

6.2.1 Modifisering av DEM

DEM avledet fra LiDAR-data vil ikke kunne modellere vann som drenerer under ulike objekter. Stikkrenner og kulverter må tas i betraktning ved flomvei analyser i menneskepåvirkede områder. I studieområdet er drenering en utfordring som trenger en helhetlig vurdering som kan avdekke og forebygge store samt svært kostbare vannrelaterte skader.

I Brandrudsåa er det utfordrende å oppnå en fullstendig oversikt over stikkrenner og kulverter. For få tilgang til data er det å kartlegge hvem som er ansvarlig for de ulike delene av infrastrukturen i Brandrudsåa nødvendig. Jernbaneverket som er eier av Dovrebanen har ansvar for stikkrenner og kulverter ved egen infrastruktur. Statens Vegvesen har ansvaret for drift og vedlikehold av riks- og fylkesveinettet for Brandrudsåa innebærer dette fylkesvei 407, 405, 403 og E6. Kommunen, Sør-Fron, har ansvaret for kommunale veier med tilhørende stikkrenner, grøfter og bruer. I private områder er det den enkelte grunneier eller eier av infrastruktur som er ansvarlig for å sikre eiendommen for skader som kan oppstå ved mangelfull drenering. Det er grunneier som er ansvarlig

for å utføre tiltak som ikke fører til skader nedstrøms [Falch et al. \[2014\]](#).

Det er i utgangspunktet ikke vanlig praksis for alle kommuner å stedfeste stikkrenner. I forbindelse NIFS-prosjektet er en relativt stor andel av stikkrenne i Brandrudsåa blitt kartlagt tidligere. Jernbaneverket og Statens Vegvesen har stedfestet sine stikkrenner. De største utfordringene trer frem ved ved drenering i private eiendommer og infrastruktur. GPS-punktene er innhentet fra kommunen Jernbaneverket, Statens Vegvesen og feltbefaringer, men det er allikevel knyttet en stor usikkerhet til kartlaget med stikkrenner over Brandrudsåa.

For å kunne senke stikkrenner må GPS-punktene digitaliseres som linjer i rasterformat. Metoden kan føre til flere feilkilder. For eksempel er det vanskelig å være sikker på om stikkrenner har utløpet tvers over veien, på skrå eller om utløpet er lokalisert lengre unna, om dette ikke kommer tydelig frem på flyfoto. En annen feilkilde er at noen av GPS-punktene er kategorisert som sluk. Hvor sluket fører til er ikke kjent og disse punktene har ikke blitt med i modellen, men påvirker dreneringen i områdene det gjelder.

Den største kilden til usikkerhet i flomvei analysene er knyttet til mangelen på stedfesting av stikkrenner på private eiendommer og infrastruktur. Brandrudsåa har store arealer som er knyttet til landbruk. I landbruksarealene kan LiDAR-dataene kartlegge grøfter på overflaten, men ikke fange opp om det eksisterer drenering lokalisert under overflaten. Arbeide med datagrunnlaget er viktig, men tid- og ressurskrevende arbeid. Selv om arbeidet med å kartlegge og stedfeste dreneringen i Brandrudsåa må ansees som ikke komplett, har metoden i oppgaven fungert til formålet.

Ved å modifisere DEM kan en modellere flomveier med utgangspunkt i ulike scenarioer. Ved å bruke en versjon av DEM der bygninger er hevet simulerer en at stikkrenne er blokkerte og ved å legge til stikkrenner, kan en simulere at dreneringsystemet er åpnet. Ved å sammenlikne de to scenariene med eksisterende skadepunkter, kan det avdekke områder der det er tette eller mangelfull kapasitet på stikkrenner.

6.2.2 Sårbare områder

Ved å analysere modellerte flomveier med skadepunkter er det i denne oppgaven avdekket fire områder der det kan ha vært tette eller mangelfull kapasitet på stikkrenner som har forårsaket skadene.

Øverst i Kvarvvegen ligger område (1), se figur 5.8. Her viser flomvei analysene at dersom vannet hadde drenert igjennom stikkrenna før skadepunktet, ville antall akkumulert celler blitt redusert. I virkeligheten kan det bety at det ikke ville ha ført til like store mengder med vann som kan ha vært årsaken til skadepunktet. Antall celler som akkumuleres dersom stikkrenna er tett er 10 638. Hver celle er 1x1m og antallet utgjør et betydelig området som kan bidra til vann i grøften på punktet markert med skadepunkt. Dersom mengden vann i grøften på oversiden av Kvarvvegen hadde blitt redusert kan det ha ført til en reduksjon i erosjonskraften i grøften. Grøften hadde tydelige spor etter erosjon etter flommen i 2013 [Sellevold and Edvardsen \[2013\]](#). Hvis mengden vann blir redusert kan det bidra til mindre sedimenttransport som potensielt kan bidra til tette stikkrenner ned langs veien. Arealene som er lokalisert på oversiden av veien er åkerlapper. Åkerlapper kan føre til at økt overflateavvenning. Selv området er lokalisert øverst i nedbørfeltet er det viktig å planlegge for at det potensielt kan drenere store mengder vann ved styrtregn. Det mangler informasjon vedrørende dimensjonering på den aktuelle stikkrenna. Det er ikke mulig si med sikkerhet hva som var årsaken til skadene, bortsett fra at de var vannrelaterte [Sellevold and Edvardsen \[2013\]](#).

I område (2), Dalseggvegen, se figur 5.9, tolkes situasjonen som mer kompleks. Kartet viser flomvei modelleringer over et område av nedbørfeltet som hadde flere registrerte skadepunkter. Resultatet avdrekker at bekken Trilla, som krysser begge veiene i kartutsnittet, er et kritisk området. Flomveianalysene viser at det bør være tilstrekkelig kapasitet på begge stikkrennene. Kapasitet er i dag på 600 mm (begge stikkrennene). Flomveianalysene viser at dersom stikkrennene ikke klarer å håndtere vannet kan det føre til konsekvenser for Dalseggvegen. Vannet fra øverste skadepunktet vil drenere ned over jordet og videre langs Dalseggvegen. Ved nederste skadepunkt, som er lokaliseringen ved en stikkrenne, kan ha ført til at vannet drenerer langs Dalseggvegen isteden for den naturlige vannveien.

Ved et scenario hvor begge stikkrennere er blokkert, vil hele 1 012 675 celler drenere til Dalseggvegen, selv ved åpne stikkrenner vil 12 968 celler drenere til samme område. I tillegg viser analysen at det vil drenere vann fra åkerlappene på oversiden Dalseggvegen. Dersom kildene som potensielt kan føre til vann langs Dalseggvegen trer i kraft samtidig, kan konsekvensene bli betydelige. Under flommen i 2013 var det flere punktskader langs dette veistrekket og kostnadene er estimert til 100 000 kr (korrespondanse Vidar Rohaugen, Sør-Fron kommune). Deler av denne analysen kan valideres ved et flyfoto fra området, se figur 5.10. Bildet viser at flomveien er lokalisert på samme sted der det er oppdaget tydelige spor av erosjon på jorden.

Område (3), Ysterivegen, se figur 5.11 I kartet over området er det tre markerte skadepunkter. Det øverste skadepunktet i Ysterivegen kan ha sammenheng med blokkert stikkrenne. Scenarioet med stengt stikkrenner viser 21 595 celler kan akkumulere vann til dette skadepunktet. Ved et scenario der stikkrenner er åpen vil det være 7254 celler som drenerer til skadepunktet. Fullstendig eller delvis blokkerte stikkrenner kan ha bidratt til at mengden vann øker betraktelig. Dagens dimensjonering på den øverste stikkrenna er på 500mm og den nederste er 600mm. I områder som er utsatt for flom, bør dimensjoneringen og inntakløsning på stikkrenner vurderes nøye.

Veistrekket fra skadepunktet midt i kartet til punktet ved bekken ble totalskadd under flommen i 2013. Flyfoto, 5.12 fra flommen var kun tilgjengelig fra nedre del av området, men bilde gir et inntrykk av omfanget av skadene. Kostnadene ble estimert til 250 000 kr (korrespondanse Vidar Rohaugen, Sør-Fron kommune). Ved åpne stikkrenner vil jorden på flyfotoet ha 128 893 celler som potensielt kan akkumulere vann. I DEM er det ikke tegn til grøfter som kan lede vannet på en tilstrekkelig måte. Analysen fanger opp at dette området er plassert slik at det potensielt kan komme store mengder vann og forebyggende tiltak bør vurderes.

6.2.3 Sammenlikning av *D8* og *D-Infinity*

For å validere algoritmene er visuell sammenlikning en av metodene som kan anvende til formålet. Ved modellering av akkumulering av vann er det forventet at modellerte

flomveier er lokalisert i eksisterende vannveier. Tidligere studier har avdekket at *D8* i mindre grad sammenfaller med eksisterende bekker og detaljer ved drenineringsveiene enn *D-Infinity* Oliveira et al. [2013]. Ved en visuell tolkning av begge algoritmene klarer begge metodene å modellere bekkene fra FKB-data tilnærmet likt. Digitaliserte bekker fra FKB-data i nedbørfeltet sammenfaller med begge metodene og det er ikke mulig å differensiere de to algoritmene nevneverdig.

Ved å studere DEM med høy og lav oppløsning har det blitt vist at forskjellen på single flow og multiple flow algoritmer øker ved lavere oppløsning Oliveira et al. [2013]. I oppgaven er analysene basert på DEM med høy oppløsning. Dette kan ha være en av årsakene til relativt små forskjeller mellom algoritmene ved visuell sammenlikning i forhold til eksisterende bekker.

Område (4), Midtre Kvarvvegen. I figur 5.13 viser begge algoritmene at vannet drenerer langs vestsiden av veien ved øverste skadepunkt. Skadepunktet er registrert som: *Spor etter kraftig erosjon i grøft*. *D-Infinity* modellerer at vannet drenerer over veien noe som kan sees i sammenheng med skadepunktet markert med stjerne i kartet.

Skadepunktet i nederste del av figuren viser skadepunkt i eksisterende vannvei. Skadepunktet er registrert med beskrivelsen: *Det er tydelige skader i vegbanen ned mot kulvert*. Det kan tenkes at *D-Infinity* modellerer et mer tilnærmet situasjonen i 2013 enn *D8* algoritmen. Ved skader i veibanen er det nærliggende å tenke at vannet har drenert oppstrøms fra østsiden av veien. Vannet kan ha bidratt til skader på veibanen ned mot kulvert.

Eksempelet fra område (4) viser at det er viktig ha grøfter som er dimensjonert for store mengder vann i flomutsatte nedbørfelt. I dette området indikerer modelleringen og beskrivelsen av skadepunktene at området ikke har tilstrekkelige grøfter. Område har høy akkumulering og mengden vann kan potensielt bli stor. Det er midlertidig potensielle feilkilder ved DEM. Vestsiden av veien er vegetert, men ved visuell inspeksjon av LAS-data med markpunkt er vurderingen at det er tilstrekkelig med markpunkt i dette området for at grøften representeres i DEM.

D8 algoritmen har en tendens til modellere parallelle strømningslinjer. Årsaken er at *D8* algoritmen kun modellerer at vannet drenerer til en celle. En konsekvens av dette er at strømningslinjen blir rektangulær. *D-Infinity* produserer ikke slike karakteristikk på grunn av at den fordeler strømmingen i henhold til geometrisk kalkulering av helning og vinkel over 8 overflater [Oliveira et al. \[2013\]](#).

Analysene i denne oppgaven kan tyde på liknende resultat. *D8* algoritmen resulterer i parallelle strømningslinjer ned skråningene i Brandrudsåa. Dette kan forstås som å modellere kunstige forhold, da dette sjeldent vil være tilfellet i virkelige/naturlige skråninger. *D-Infinity* algoritmen har ikke samme tendens da algoritmen modellerer strømning til flere celler. Analysene i oppgaven viser at der *D-Infinity* har flere parallelle strømningslinjer. En fordel ved *D-Infinity* algoritmen er at den kan modellere divergerende strøm [Tarboton \[1997\]](#). Det kan resultere i et mer naturlig modellering. Området(2), Dalseggvegen, kan trekkes frem som et eksempel på dette. *D-Infinity* algoritmen viser ikke en strøm ned skråningen og over jordet som *D8*, men viser et større felt med vann som drenerer ned. Dette kan tolkes som om *D-Infinity* gir et mer realistisk bilde (visuelt) på situasjonen som oppstår under flommen i 2013. Men ved å undersøke cellenes akkumulerte verdi er ikke situasjonen like rett frem. På den andre siden kan første steg i GIS-analyser være med øynende, og i den sammenhengen vil *D-Infinity* kartet gi brukeren inntrykk av vann på avveie. Dette kan være en fordel da kartleseren blir observant på situasjonen på grunn av det visuelle inntrykket.

Studier viser at *D8* modellerer flomveier et høyere andel flomveier med lavt antall tilstrømmende celler i hele DEM [Wilson et al. \[2007\]](#). Det kan forventes at *D8* produserer mer nøyaktig resultat nedstrøms enn oppstrøms i studieområdet.

Basert på sammenlikningen av flytalgoritmer i Brandrudsåa kan det tyde på at oppløsningen på DEM har en større påvirkning på nøyaktigheten til resultatene. Begge algoritmene kan avdekke sårbare områder (1),(2) og (3). Område (4) kan brukes om et eksempel på at *D-Infinity* algoritmen kan fungere mer optimalt med tanke på strømning til flere celler. Begge metodene sammenfaller med eksisterende bekker i området og kan ha opphav fra

at de begge er avledet i DEM med høy oppløsning. Liknende tendens har blitt avdekket ved tidligere studier [Oliveira et al. \[2013\]](#).

6.2.4 TWI

TWI fra *D8* og *D-infinity* algoritmene skiller seg fra hverandre. Visuelt er TWI rasteret for *D8* mer tydelig kanaler med celler som har høyere akkumulering av vann. *D8* avledet TWI kan sammenliknes med *D8* vanntilførende område (flow accumulation). Kanalene er resultatet fra at celler som mottar mye vann skiller seg tydelige fra tilstøtende celler. Bekkene fra FKB-dataene sammenfaller med høye TWI verdier i rasteren. Det kan bety at TWI basert på *D8* algoritmen fungerer ved å vise hvor i terrenget det tilføres mest vann.

TWI avledet fra *D-Infinity* rasteret har visuelt sett et mindre tydelig resultat. Ved å studere rasteret kan en se høye TWI verdier i grøfter langs veiene, men resultatet sammenfaller ikke like tydelig med FKB-data over bekker. *D-Infinity* resulterer i jevne mønster og ikke i tydelige kanaler. Det visuelle inntrykket kan støttes på at standardavviket er lavere i TWI rasteret fra *D-Infinity*, det er mindre spredning i celleverdiene.

D-Infinity avledet TWI resulterer i jevne mønster (Smooth patterns). Det vil si mindre variasjon på celler som ligger tilstøtende. Resultatet samsvarer med tidligere studie *D8* algoritmen analysen over TWI i Brandrudsåa hadde høyere gjennomsnittsverdi *D-Infinity*. Dette resultatet samsvarer ikke som forventet fra litteraturen [Wilson et al. \[2007\]](#).

En mulig årsak til dette kan være at TWI analysen i oppgaven har en finere oppløsning enn studiet fra litteraturen. Finere oppløsning kan resulterer i flere celler som har en heling på 0 grader. TWI likning kan ikke løses for celler som har verdi 0 og tildeles verdien nodata. I oppgaven ble celler med nodata fylt med ved å bruke et verktøy som tildeler celler med verdien 0, verdien til celler som er ligger i nærheten. Dette verktøyet kan ha påvirket de to TWI på forskjellig måte. TWI avledet fra *D8* har en mindre spredning på celleverdiene, og derfor kan et verktøy som håndterer nodata verdiene påvirke

mønstrene i rasteret i mindre grad. Ved *D8* algoritmen vil celler som har verdi 0 mest sannsynlig ikke ligge nær celler som har høy TWI på grunn av singel flow algoritmer natur. Det kan tenkes at no data-verdiene ble tildelt verdier som ikke har høy TWI verdi. Metoden kan ha ført til at mønstrene ble forsterket. Ved TWI rasteret avledet fra *D-Infinity* algoritmen kan samme metode ha bidratt til å utjevne verdiene. I *D-Infinity* rasteret har TWI verdiene ikke resultert i like tydelige mønstre som grunner i *multiple flow* algoritmens måte å tildele flere celler vanntilførsel. Metoden for å håndtere no data kan ha ført til celleverdier med mindre variasjon. Det ble valgt å anvende TWI avledet fra *D8* i *Fuzzy logic* analysen.

GIS-analyse av flomveier kan være et tiltak som styrker den kommunale planleggingen. Oppgaven har analyser av et lite nedbørfelt og kan ha ført til en mulig avdekking av kritiske områder. Å utarbeide en database over stikkrenner og kulverter i flomutsatte områder være et positivt tiltak. En fullstendig database over stikkrenner vil kunne føre til at modellering av flomvekker i DEM bli mer tilnærmet virkeligheten. Det vil kunne bidra til at kommuner kan analysere og avdekke sårbare områder.

Styrtflom som oppstår i små bratte nedbørfelt kan utføre stor skade når de inntreffer. Generelle tiltak som kan bedre samfunnets beredskap er forhåndskartlegge nedbørfelt som er utsatt for styrtflom. Kartlegging bør i tillegg inneholde løsmasser og risiko for flom- og jordskred. Transport av løsmasser er en viktig faktor i denne forbindelse ved at høy transport øker skadeomfanget av styrtflom [Vatne \[2013b\]](#).

6.3 Aktsomhetskart

6.3.1 Valg av parametre og databehandling

Det å definere medlemskapverdi til parametrene er avgjørende i *Fuzzy logic* analyser av flom- og jordskredfare [Ercanoglu and Gokceoglu \[2004\]](#). Helning er en kontrollerende faktor [Akgun et al. \[2012\]](#). I oppgaven ble helning tildelt medlemskapverdi på grunnlag av at en økning i helningen øker sannsynligheten for utløsningen av skred. Fordelingen av helning i Brandrudsåa er gjennomsnittlig (12 °). S-formet kurve som medlemskapfunksjon

tar utgangspunkt i at verdier over gjennomsnitt skal tildeles en høy medlemskapfunksjon. Andre studier har valgt å gruppere helningen i kategorier basert på sammenhengen mellom helning og skred som har blitt kartlagt i området [Ercanoglu and Gokceoglu \[2004\]](#). Ved å kategorisere helningen etter sannsynlighet, er en helning mellom 20-40° som tildeles høyest medlemskapverdi. Valg av medlemskapfunksjon i masteroppgaven kan i dette området argumenteres for at det er et nedbørfelt med relativt jevn topografi. På kartet over helning, se figur 3.7, er områdene med høy helning lokalisert i forbindelse med raviner. Raviner er en landskapform som særlig er knyttet om utløsningen av flomskred [Selby et al. \[1982\]](#). Brandrudsåa er i hovedsak dekket av løsmasser og det vurderes at selv om det er en bratt helning enkelte steder, vil det ikke indikere at det mangler tilgjengelige løsmasser for at skred kan bli utløst.

Profil-kurvatur har tildelt høy medlemskapverdi til områder som er konvekse i retning av helningen, se figur A.2 i vedlegg. Fordelingen av verdiene som er utgangspunktet for valg av medlemskapfunksjon er satt til Z-formet kurve. Verdier over gjennomsnittet ble tildelt en høy medlemskapverdi, da konvekse skråninger kan være en utløsende faktor for skred [Wilson and Gallant \[2000a\]](#). Plan-kurvaturen (figur A.3 i vedlegg) er et uttrykk for kurvaturen i horisontal retning. Medlemskapfunksjonen ble i likhet med profil-kurvaturen satt til Z-formet. I analysen ble verdier under gjennomsnittet (negative verdier) antatt å representere raviner og dermed tildelt en høy medlemskapverdi. Plan og profil-kurvaturen ble slått sammen med Fuzzy Overlay OR. Det innebærer at det blir et samlet parameter for kurvatur og både plan- og profilkurvaturen er representert i aktsomhetsanalysen.

TWI som ble avledet fra *D8* algoritmen ble anvendt som en indikator for hvor i studieområdet topografien tilsier at vann kan akkumuleres. Vann er i stor grad en utløsendefaktor til skred [Selby et al. \[1982\]](#). Medlemskapfunksjonen har blitt tildelt en verdi ut i fra S-formet kurve. Funksjonen antar at verdier over gjennomsnittet skal tildels en høy medlemskapverdi. Det innebærer at TWI har høye medlemskapverdier i områder. Årsaken til TWI avledet fra *D8* og ikke *D-Infinity* ble valgt, var i denne analysen kan det være en fordel om det er tydelige forskjeller i verdiene. Tydelige forskjeller i TWI verdier betyr at medlemskapverdiene blir tydeligere. Tanken er at det kan føre til tydeligere grenser i aktsomhetskartet.

Arealbruk i Brandrudsåa er et miljøbestemt parameter. I oppgaven er arealbruken i

hovedsak knyttet til tilstedeværelsen av vegetasjon og jordbruk. Vegetasjon påvirker utløsningen for skred på flere måter som diskutert i kapitel 3. I analysen ble vegetasjon antatt å ha en stabiliserende påvirkning på utløsningen av skred i studieområdet. Jordbruksarealene i Brandrudsåa er vurdert til å indirekte øke sannsynligheten til utløsningen av skred, da jordbruk kan øke overflateavrenningen og tilgang til sedimenter kan øke. En lineær medlemskapfunksjonen ble valgt for å representere klassifiseringen av arealbruks og førte til at områder kategorisert som jordbruk og snaumark ble tildelt høye medlemskapverdi. Skog, myr, vann og bebygde områder fikk lave medlemskapverdier.

Verdiene som ble tildelt de ulike kategoriene er gitt av forfatteren med utgangspunkt i litteraturen. En kilde til usikkerhet kan være grad av detaljer til kartgrunnet (AR50). Kartet etter visuell inspeksjon ser ikke ut til å sammenfalle med virkeligheten. Særlig gjelder det områder som er kategorisert som snaumark. Det er områder som er klassifisert som fastmark med naturlig vegetasjonsdekke (som ikke er skog). Det er i utgangspunktet ikke lett å si hvordan kategorien påvirker utløsningen av skred. Om kategorien inneholder et heldekkede vegetasjonsdekke vil snaumark være en stabiliserende faktor i vekstsesongen. Ved å sammenlikne grunnlagsdataene (AR50) med flyfoto er områder kategorisert som snaumark i virkeligheten jordbruksarealer. Av den grunn ble kategoriseringen tildelt høy medlemskapverdi, noe som kan påvirke resultatene og øke usikkerheten til aktsomhetskartet.

Løsmasse og berggrunn er geologiske parametre som i ulik grad påvirker utløsningen av flom- og jordskred. Berggrunnen ble innledningsvis inkludert i modellen, men etter å studere påvirkningen parametre fikk i kartet ble det vurdert å utelate berggrunn fra modellen. Berggrunn har en indirekte påvirkning til flom- og jordskred ved å påvirke dannelse av løsmassene i området. Tilgjengelige løsmasser er en avgjørende faktor og har stor påvirkning på resultatet. Medlemskapverdiene er basert på historiske skred og dette kan bidra til å gjenspeile sensitiviteten til løsmassene i Gudbrandsdalen. Det ble antatt en lineær sammenheng ut i fra antall skred sammenliknet med løsmasse kategori. Metoden vurderes som den mest hensiktsmessig måte å avgjøre medlemskapverdien til løsmassene på, da det ikke er registrert tidligere skredhendelser i Brandrudsåa.

Flere studier bruker avstand til vei som et parametre, se for eksempel [Akgun et al.](#)

[2008], Oh and Pradhan [2011] og Bui et al. [2012]. Veier er et inngrep i terrenget og kan påvirke skråningstabiliteten både ved å endre helningen og de hydrologiske forholdene. Når de hydrologiske forholdene endres øker stresset som virker på skråningen Pourghasemi et al. [2012]. Selv om flere studier har med avstand til vei som et parametre, er parametre utelatt i analysen. Valget er basert på oppløsningen til DEM som ble anvendt i analysen. Ovennevnte studier har en lavere oppløsning enn DEM i oppgaven. I en DEM med lav oppløsning (eks 10x10m) vil ikke veien bli representert ved høydeverdier i modellen. Ved å anvende DEM med høy oppløsning kan det argumenteres for at veien bli representert ved LiDAR punktene. Påvirkningen av veien blir representert i aktsomhetsanalysen ved implementeringen av parametre som helning, TWI og Kurvatur. Figur 5.16 viser aktsomhetskartet. I tilknytting til veiene er det områder som vurderes å potensiell være utsatt for skred og brukes til å underbygge utelatelsen av vei i analysen.

Valg av medlemskapfunksjon i aktsomhetsanalysen med utvalgte parametre ble gjort ved å undersøke liknende studier. Ved å sammenlikne resultatet fra *Fuzzy logic* analysen med historiske hendelser fant Lee [2007] at Fuzzy GAMMA λ 0.975 gav det mest nøyaktige resultatet. Fuzzy OR gav det minst nøyaktige resultatet. Selv om ikke Brandrudsåa har historiske skred hendelser å sammenlikne med, kan visuell tolkning av aktsomhetskartene fra Fuzzy OR og Fuzzy AND (TilleggB) gi liknende konklusjon.

Fuzzy OR vil tildele gi en celle i aktsomhetskartet høy verdi om kun en av cellene i parametrene har en høy verdi. Det innebærer at feilaktige celler kan få en høy verdi. I kartet (figur B.1 kommer det frem at områder med minimal helning er klassifisert som nest høyeste aktsomhet kategori. Sannsynligheten for at et skred vil kunne gå på tilnærmet flatmark, selv om det er tilgjengelige løsmasser og tilstedeværelse av vann, kan sier å være lav. På en annen side vil kartet særlig trekke frem områder der alle parametrene har høy medlemskapverdi. Men alle parametrene trenger ikke være tilstede samtidig for at et skred skal kunne utløses. Fuzzy OR som medlemskapfunksjonen bør ikke anvendes i aktsomhetsanalyse over flom- og jordskred. Fuzzy AND tildeler høy aktsomhetsverdi der celler har høy medlemskapverdi i alle utvalgte parametrene. Det fører til et kart med lave celleverdier. Argumentet for å ikke benytte medlemskapfunksjonen er at et skred ikke er avhengig av høye medlemskapverdier i alle parametrene for at flom- og jordskred

skal utløses. Et eksempel er at skred kan utløses i vegeterte, bratte skrånninger. Figur B.2 er et eksempel på bruk av Fuzzy AND.

Aktsomhets kategoriene ble inndelt i 5 kategorier (svært lav, lav, moderat, høy og svært høy). Spredningen til verdiene i resultatet er ikke normalfordelt. Det innebærer at en ikke kan kategorisere dataene ved serielt bestemte klassegrenser som standardavvik eller like intervall. Det ble valgt å avgjøre inndelingen av klassene ideografisk. Dataene inndeles i sekvenser basert på en indre logikk Rød [2009]. Dataene er positivt vridd. Kvantil inndeling ble vurdert som overordnet naturlig brudd inndelingen Akgun et al. [2012]. Med 5 klasser deles 20% av den laveste og høyeste av fordelingen Rød [2009].

6.3.1.1 Aktsomhetkart

Aktsomhetsanalyser tar utgangspunkt i følgende påstander: (1) Fortiden er nøkkelen til å forstå fremtiden. I områder der skred har gått tidligere er det sannsynlig at det tilsvarende hendelser vil forekomme i fremtiden. (2) Områder som har liknende topografi, geologi og geomorfologi som områder med tidligere utløst skred, har høyere sannsynlighet for at vil hende i fremtiden Fell et al. [2008].

Selv om det meste av aktsomhet- og risikokartlegging har utgangspunkt i et kausalt forhold mellom historiske skred og utløsningen av fremtidig skred, kan en se situasjonen på en annen måte. Det er ikke slik at forholdene som førte til skred i fortiden nødvendigvis vil være tilsvarende utløsende forhold i fremtiden. Ved en endring i kausale faktorer, som for eksempel å anlegge en vei, kan et område som tidligere er kartlagt som lav aktsomhetsgrad øke i aktsomhetsgrad van Westen et al. [2008]. I analyser ved bruk av høy oppløselig DEM kan noen av endringer fanges opp, men det er allikevel viktig å ta til etterretning at utløsende årsaker vil kunne endres i fremtiden. Særlig med tanke på fremtidens klimaendringer

Det mest utfordrerne i prinsippet om uniformitarianisme har sammenheng med miljøbetingelser (predisposisjonelle faktorer). Å forutse hvordan predisposisjonelle faktorer vil endre seg i fremtiden er vanskelig oppgave. På en side kan en med stor sikkerhet anta at geologiske faktorer ikke vil endre i nær fremtid. Men lokale modifiseringer av morfologiske forhold

kan endres over en relativ kort tidsperiode. Særlig erosjon med opphav i små vassdrag er en slik faktor. Et område som har en hurtig respons til styrtregn kan endre forhold over en kortere tidsperiode. En annen faktor som kan endre seg over kort tid er arealbruken [Guzzetti et al. \[2005\]](#). Ved å fjerne vegetasjon i Brandrudsåa kan andre områder tildeles en høyere aktsomhetsgrad enn analysen presenterer i oppgaven.

I småskala analyser er inndelingen av geologiske parametre i meningsfulle enheter en utfordring. Det er særlig i soner mellom bergarter som er vanskelig å kartlegge i liten skala. Informasjon om løsmasser er det hovedsaklig to typer informasjon som er viktig i forhold til flom- og jordskred. Det angår jordartens geotekniske og hydrologiske egenskaper. Det andre er jordartens inndeling med informasjon om mektigheten [van Westen et al. \[2008\]](#). Det er tilgjengeligheten på romlig data som er den største begrensende faktoren i kartlegging av skredfare og risiko.

Reliabiliteten og nøyaktigheten til modellen er avhengig av dataene en baseres på [Erca-noglu and Gokceoglu \[2004\]](#). Flere studier viser at *Fuzzy logic* fungerer hensiktsmessig og korrelerer med tidligere skredhendelser i regionale studieområder [Zhu et al. \[2014\]](#). Ved å overføre metoden til et lite nedbørfelt oppstår det utfordringer, særlig oppløsningen og grad av detaljer til dataene som analysen baseres på. Det er viktig å påpeke at oppløsningen til arealbruk, løsmasse- og berggrunnskartene som ble anvendt i analysene er lave oppløsning enn ønskelig. I virkeligheten er kategoriene og grensene mer diffuse og kan variere lokalt i studieområdet. Resultatene fra kartene kan betraktes som upresise for et lite studieområde.

Ved å sammenlikne *Fuzzy logic* med andre metoder for å utarbeide aktsomhetkart for flom- og jordskred kan en si at det er en relativ enkel metode å benytte. Frequency ratio er en enklere metode, både ved analyse av inndata, kalkuleringen og resultatet. Metoden er lett forståelig og krever ikke tilleggsprogrammer, men metoden er helt avhengig av tilgjengelige datasett på historiske hendelser. Ved småskala analyser som oppgaven beskriver eksisterer det ikke tilgjengelig data for å utføre en slik analyse. Studier har vist at frequency ratio ikke produserer like nøyaktige resultater som logisk regresjon og artificial neural networks (AAN). Sistnevnte metoder krever en konvertering til ASCII eller liknende formater. I tillegg må dataene konverteres til rasterformat etter statistiske analyser. Det er ofte store mengder data som er vanskelig å bearbeide statistiske

programvare [Yilmaz \[2009\]](#).

6.3.1.2 Validering av flom- og jordskred analysen

Ved å sammenlikne resultatet fra *Fuzzy logic* analysen med NVEs offisielle aktsomhetskart for flom- og jordskred kan en til oppdage enkelte likhetstrekk. Se figur 5.18. Områder som er potensielt kan være utsatt for flom og jordskred er lokalisert i samme del av nedbørfeltet. Aktsomhetskartet fra *Fuzzy logic* har diffuse grenser og produserer ikke adskilte områder som NVEs kart. Årsaken til at det er at større områder i Brandrudsåa som oppnår høy og høysete aktsomhetsgrad, kan ha sammenheng med hvilken medlemskapverdi helning fikk i analysen. Det å tildele medlemskapverdier fra S-formet kurve gjør at områder med relativ lav helning får høye medlemskapverdier. Argumentene for å avgjør medlemskap verdien slik er tidligere nevnt, men det kan ha hatt en negativ innvirkning på resultatet. NVE anvender en multiple flow algoritme for modellere utløpsområdet for skredet. Resultatet fra *Fuzzy logic* viser ikke utløpsområdet til potensielle flom- og jordskred. Resultatet viser kun områder for utløsning og fører til at metodene i utgangspunktet ikke er sammenliknbare.

NVEs aktsomhetsområder sammenfaller med store skadepunkt fra flommen i 2013. Skadepunktene er lokalisert i forbindelse med eksisterende vannveier og tilsier at punktene ikke kan sammenliknes opp mot flom- og jordskred. Skadepunktene kan sees i sammenheng med tilgjengelige løsmasser. Resultatet fra analysen kan ikke valideres opp mot skred i området og er et usikkerhetsmoment med analysen. Ved å validere resultatet mot skred i området kan trekke frem egenskaper ved studieområdet som er særegent. Dette kan føre til mindre generalisering og forenkling [Ercanoglu and Gokceoglu \[2004\]](#).

Kart er en representasjon av virkeligheten, men er ikke nødvendigvis en ekte representasjon [Rød \[2009\]](#). Mennesker som leser og tolker kart oppfatter informasjonen forskjellig. Det er viktig å påpeke at alle subjektive valg vedrørende databehandling, valg av analyser og visualisering påvirker resultatet, og dermed representasjonen av virkeligheten.

Aktsomhetskartene som blir presentert i oppgaven viser at Brandrudsåa har topografiske, geologiske og miljøbestemte parametre som indikerer at enkelte områder er potensielt utsatt for flom- og jordskred. Tilstedeværelse av vann er beregnet ut i fra topografien (TWI) og en antar en stabil tilstand (steady state). Det innebærer at området må få tilført vann for at verdien for TWI skal inntre som fare. Det er derfor grunn til å anta at under intens nedbør bør en være ekstra varsom i områder som har oppnådd høy aktsomhetsgrad i resultatet.

Det å utarbeide aktsomhetskart for flom- og jordskred krever at kartprodusenten er klar over signalene kartet sender ut. I Brandrudsåa bor mennesker og det er mennesker som har arbeidsplassen sin der. I tillegg det er to store trafikkåre som fører til at det er et høyt antall mennesker som passerer området hver dag. Analysen tilsier at det potensielt kan utløses flom- og jordskred i enkelte områder i Brandrudsåa, men har ingen bestemt sannsynlighet knyttet mot at et skred skal utløses. Det er viktig å bemerke oppgaven har som formål å undersøke om metoden fungerer, men ikke er en offisiell aktsomhet analyse for flom- og jordskred.

6.4 Forslag til videre arbeid

Forslag for å bedre konklusjonen med flytalgoritmene er å undersøke og sammenlikne flere typer, både multiple og single flow algoritmer. Det ville også ha interessant å undersøke hvordan algoritmene skiller seg fra hverandre med tanke på å kalkulere nedbørfelt.

Arbeide med *Fuzzy logic* i en regionalskala. Ved å bruke tidligere registeret skredhendelser fra Gudbrandsdalen og Ottadalen [Walberg and Devoli \[2014\]](#) for validere resultatene. Det er interessant å undersøke om *Fuzzy logic* sammenfaller med tidligere registrerte skred og dermed komme nærmere en konklusjon.

6.5 Avslutning

Ved å anvende to ulike flytalgoritmer har analysene kommet frem til at *D-Infinity* er mest hensiktsmessig for å indentifisere områder som er utsatt for vann på avveie. Dette

har bakgrunn i at algoritmen kan modellere strømning til flere celler noe som kan produsere en divergerende strømning. Fordelen kommer særlig til syne der DEM har tvetydig strømningsretning. Analysene i oppgaven viser at både *D8* og *D-Infinity* kan benyttes til formålet. *D8* er enklere i anvendelsen, men gir et mindre nøyaktig resultat da det kun modellerer vann til en celle. *D8* og *D-Infinity* sammenfaller i 3 av de 4 kritiske områdene som er identifisert i analysen. I område 4 er det kun *D-Infinity* som sammenfaller med tidligere registrerte skadepunkt fra flommen i 2013. Her modellerer begge vann i det samme område, men med ulik spredning i terrenget.

Aktsomheteskartet viser at parametre som helning, kurvatur, TWI, løsmasse og arealbruk kan i en *Fuzzy logic* overlagsanalyse vise områder som potensielt er utsatt for flom- og jordskred. Analysen avdekker at primær-og sekundærattributter avledet fra høy oppløselig DEM fungerer godt. Det er større usikkerhet ved å benytte grunnlagsdata med en lavere oppløsning når en undersøker flom og jordskred aktsomhet i små nedbørfelt.

Bibliografi

- Akgun, A., Dag, S., and Bulut, F. (2008). Landslide susceptibility mapping for a landslide-prone area (Findikli, NE of Turkey) by likelihood-frequency ratio and weighted linear combination models. *Environmental Geology*, 54(6):1127–1143.
- Akgun, A., Sezer, E. A., Nefeslioglu, H. A., Gokceoglu, C., and Pradhan, B. (2012). An easy-to-use MATLAB program (MamLand) for the assessment of landslide susceptibility using a Mamdani fuzzy algorithm. *Computers & Geosciences*, 38(1):23–34.
- Andersen, B. G. (2000). *Istider i Norge, landskap formet av istidenes breer*. Oslo : Universitetsforlaget.
- Bater, C. W. and Coops, N. C. (2009). Evaluating error associated with lidar-derived DEM interpolation. *Computers & Geosciences*, 35(2):289–300.
- Berthling, I. (2013). *Skredfare i Norge i et fremtidig klima* i Bye, L. M., Lein, H., & Rød, J. K. (red.) *Mot en farligere fremtid?* Akademika forlag.
- Beven, K. and Kirkby, M. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Journal*, 24(1):43–69.
- Bratlie, R. (2013). Gis finner flomveiene. *Ex flood*, NVE, Bioforsk, Universitetet for miljø og biovitenskap, Nedre Eiker Kommune.
- Brattebø, H. (2013). BM2 vann- og miljøteknikk. *Kompendium TVM4101*.
- Bui, D. T., Pradhan, B., Lofman, O., Revhaug, I., and Dick, O. B. (2012). Spatial prediction of landslide hazards in Hoa Binh province (Vietnam): a comparative assessment of the efficacy of evidential belief functions and fuzzy logic models. *Catena*, 96:28–40.

- Church, M. (2002). Geomorphic thresholds in riverine landscapes. *Freshwater biology*, 47(4):541–557.
- Clarke, S. and Burnett, K. (2003). Comparison of digital elevation models for aquatic data development. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(12):1367–1375.
- Collier, C. (2007). Flash flood forecasting: What are the limits of predictability? *Quarterly Journal of the royal meteorological society*, 133(622):3–23.
- DBS (2013). Evaluering av myndighetenes forebyggingsarbeid og håndtering av flommen i mai 2013. *Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap*.
- Du, J. C. and Teng, H. C. (2007). 3D laser scanning and GPS technology for landslide earthwork volume estimation. *Automation in Construction*, 16(5):657–663.
- Ercanoglu, M. and Gokceoglu, C. (2004). Use of fuzzy relations to produce landslide susceptibility map of a landslide prone area (west black sea region, turkey). *Engineering Geology*, 75(3):229–250.
- ESRI (2013). <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1>. (accessed april 2015).
- ESRI (2014). <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.2/>, (accessed april 2015).
- Falch, E., Holmesland, M., and Biørn, J. (2014). Samarbeid og koordinering vedrørende naturfare: ministudie av fellesprosjektet: Naturfareprosjektet: Delprosjekt 1: Naturskadestrategi. *Norges vassdrags- og energidirektorat i et samarbeid med Statens vegvesen og Jernbaneverket*, 54:1–23.
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., and Savage, W. Z. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 102(3):85–98.
- Fischer, L., Rubensdotter, L., Sletten, K., Stalsberg, K., Melchiorre, C., Horton, P., and Jaboyedoff, M. (2012). Debris flow modeling for susceptibility mapping at regional to national scale in Norway. In *Proceedings of the 11th International and 2nd North American Symposium on Landslides*, pages 3–8.
- Fremtidens-byer (2010). Kartlegging av åpne flomveier i urbane områder. *Regjeringen.no*.

- Gallay, M. (2013). Direct acquisition of data: Airborne laser scanning. *Geomorphological Techniques*.
- Garbrecht, J. and Martz, L. W. (1997). The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models. *Journal of hydrology*, 193(1-4):204–213.
- Gemitzi, A., Falalakis, G., Eskioglou, P., and Petalas, C. (2011). Evaluating landslide susceptibility using environmental factors, fuzzy membership functions and GIS. *Global Nest Journal*, 13:28–40.
- Gomez, H. and Kavzoglu, T. (2005). Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural networks in Jabonosa River Basin, Venezuela. *Engineering Geology*, 78(1):11–27.
- Gruber, S. and Peckham, S. (2009). Land-surface parameters and objects in hydrology. *Developments in Soil Science*, 33:171–194.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., and Ardizzone, F. (2005). Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*, 72(1):272–299.
- Hanssen-Bauer, I., Drange, H., Førland, E., Roald, L., Børsheim, K., Hisdal, H., Lawrence, D., Nesje, A., Sandven, S., Sorteberg, A., Sundby, S., and Vasskog, K. & Ådlandsvik, B. (2009). Klima i Norge 2100. Bakgrunnsmateriale til NOU Klimatilpassing. *Norsk klimasenter, Oslo*.
- Hassan, M. A., Church, M., Lisle, T. E., Brardinoni, F., Benda, L., and Grant, G. E. (2005). Sediment transport and channel morphology of small, forested streams1.
- Hengl, T. (2006). Finding the right pixel size. *Computers & Geosciences*, 32(9):1283–1298.
- Hengl, T. and Evans, I. S. (2009). Mathematical and digital models of the land surface. *Developments in Soil Science*, 33:31–63.
- Holmqvist, E. (2010). *Hydrologi*, i Fergus, T., Hoseth, K.A., & Sæterbø, E. (Red.) *Vassdragshåndboka*. Tapir Akademiske Forlag.
- Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M.-H., Loye, A., Metzger, R., and Pedrazzini, A. (2012). Use of LIDAR in landslide investigations: a review. *Natural hazards*, 61(1):5–28.

- Klakegg, O., Hofmeister, F., and Gilo, M. D. (2008). Ressursoversikt fra skog og landskap 02/2008. *Norsk institutt for skog og landskap*.
- Klir, G. J. and Folger, T. A. (1988). Fuzzy sets, uncertainty, and information.
- Kobler, A., Pfeifer, N., Ogrinc, P., Todorovski, L., Oštir, K., and Džeroski, S. (2007). Repetitive interpolation: A robust algorithm for DTM generation from aerial laser scanner data in forested terrain. *Remote Sensing of Environment*, 108(1):9–23.
- Lawrence, D. and Hisdal, H. (2011). Hydrological projections for floods in norway under a future climate. *NVE, Oslo*.
- Lee, S. (2007). Application and verification of fuzzy algebraic operators to landslide susceptibility mapping. *Environmental Geology*, 52(4):615–623.
- Li, Z., Zhu, C., and Gold, C. (2010). *Digital terrain modeling: principles and methodology*. CRC press.
- Liu, X. (2008). Airborne lidar for dem generation: some critical issues. *Progress in Physical Geography*, 32(1):31–49.
- Marchi, L., Borga, M., Preciso, E., and Gaume, E. (2010). Characterisation of selected extreme flash floods in europe and implications for flood risk management. *Journal of Hydrology*, 394(1):118–133.
- Murphy, P. N., Ogilvie, J., Meng, F.-R., and Arp, P. (2008). Stream network modelling using lidar and photogrammetric digital elevation models: a comparison and field verification. *Hydrological Processes*, 22(12):1747–1754.
- NIFS (2015). Om prosjektet. <http://www.naturfare.no/>.
- NVE (2014). Sikkerhet mot skred i bratt terreng. kartlegging av skredfare i arealplanlegging og byggesak. *Veileder*, 8.
- NVE, N. v.-o. e. (2002). Avrenningskart for norge. /AArsmiddelverdier for avrenning 1961-1990.
- O’Callaghan, J. F. and Mark, D. M. (1984). The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer vision, graphics, and image processing*, 28(3):323–344.

- Oh, H.-J. and Pradhan, B. (2011). Application of a neuro-fuzzy model to landslide-susceptibility mapping for shallow landslides in a tropical hilly area. *Computers & Geosciences*, 37(9):1264–1276.
- Oliveira, A. H., de Freitas, D. A. F., Neto, G. K., Silva, M. L. N., da Silva, M. A., and Curi, N. (2013). *Development of topographic factor modeling for application in soil erosion models*. INTECH Open Access Publisher.
- Pincott-Miller, D., McGarry, D., Fairweather, H., and Srivastava, S. (2012). Review and framework development for addressing flash flood potential using gis assisted spatial-hydrologic modelling. In *Papers and Presentations of Queensland Surveying and Spatial Conference 2012*, pages 1–16. Spatial Sciences Institute.
- Pourghasemi, H. R., Pradhan, B., and Gokceoglu, C. (2012). Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (ahp) to landslide susceptibility mapping at haraz watershed, iran. *Natural Hazards*, 63(2):965–996.
- Pradhan, B. (2010). Application of an advanced fuzzy logic model for landslide susceptibility analysis. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 3(3):370–381.
- Pradhan, B., Sezer, E. A., Gokceoglu, C., and Buchroithner, M. F. (2010). Landslide susceptibility mapping by neuro-fuzzy approach in a landslide-prone area (cameron highlands, malaysia). *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 48(12):4164–4177.
- Ramberg, I. B., Nøttvedt, A., Bryhni, I., Solli, A., and Nordgulen, Ø. (2006). *Landet blir til: Norges geologi*. Norsk geologisk forening.
- Regjeringen (2010). Tilpassing til eit klima i endring. samfunnet si s/aarbarheit og behov for tilpassing til konsekvensar av klimaendringane. (nou).
- Reuter, H., Hengl, T., Gessler, P., and Soille, P. (2009). Preparation of dems for geomorphometric analysis. *Developments in Soil Science*, 33:87–120.
- R.J. Pike, I. E. and Hengl, T. (2009). *Geomorphometry: A Brief Guide*. Hengl, Tomislav and Reuter, Hannes I (red) in *Geomorphometry: concepts, software, applications*, volume 33. Elsevier.
- Rød, J. K. (2009). Verktøy for å beskrive verden.

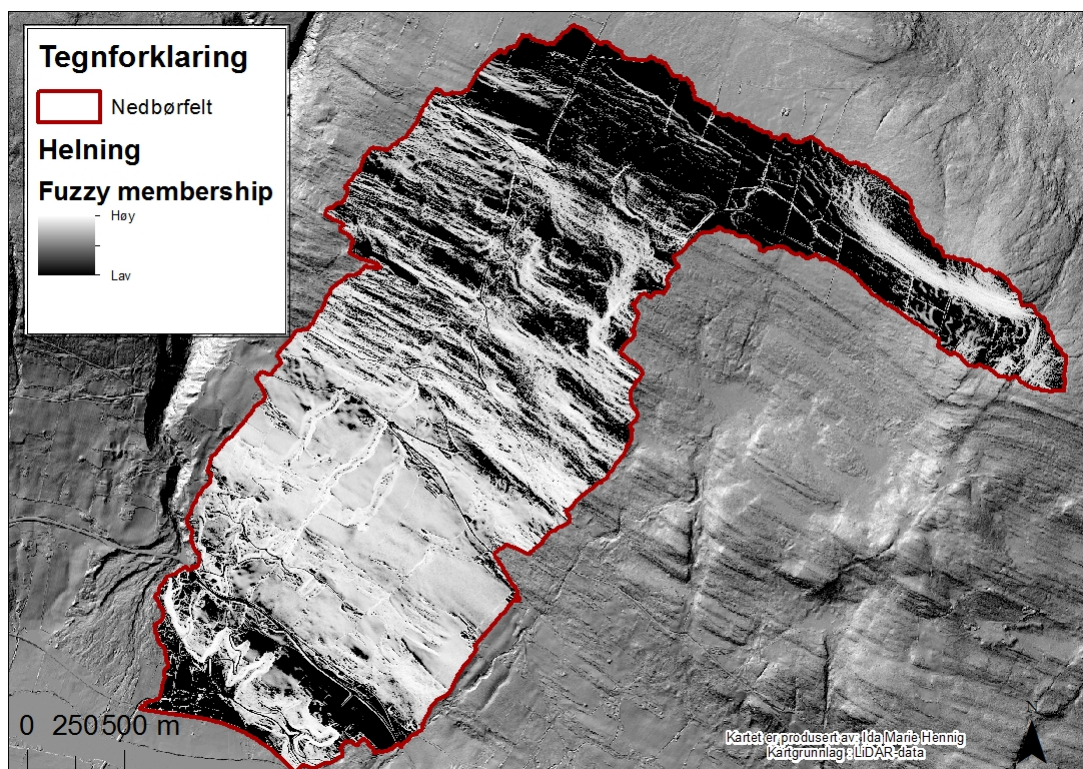
- Sadeghi, B. and Khalajmasoumi, M. (2015). A futuristic review for evaluation of geothermal potentials using fuzzy logic and binary index overlay in gis environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43:818–831.
- Selby, M. J. et al. (1982). Hillslope materials and processes. *Hillslope materials and processes*.
- Sellevoid, J. and Edvardsen, D. (2013). Vannrelaterte skader langs e6 biri - otta. *STATENS VEGVESENS RAPPORTER*, 323:32.
- Side, R. C. and Ochiai, H. (2006). *Landslides: processes, prediction, and land use*, volume 18. American Geophysical Union.
- Skogseth, T. and Wangen, H. (1998). *Grunnleggende landmåling*. Universitetsforlaget.
- Sletten, K. and Blikra, L. (2007). Holocene colluvial (debris-flow and water-flow) processes in eastern norway: stratigraphy, chronology and palaeoenvironmental implications. *Journal of quaternary science*, 22(6):619–635.
- Stenvik, K. (2011). Urban flom som konsekvens av klimaendringer - en gis studie. Master's thesis, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU).
- Strager, M. P., Fletcher, J. J., Strager, J. M., Yuill, C. B., Eli, R. N., Petty, J. T., and Lamont, S. J. (2010). Watershed analysis with gis: The watershed characterization and modeling system software application. *Computers & Geosciences*, 36(7):970–976.
- Tarboton, D. G. (1997). A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water resources research*, 33(2):309–319.
- van Westen, C. J., Castellanos, E., and Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: an overview. *Engineering geology*, 102(3):112–131.
- Vatne, G. (2013a). *Klima og flom - I fortid og fremtid* i Bye, L.M., Lein, H. og Rød, J.K. (red.) *Mot en farligere fremtid?* Akademika forlag.
- Vatne, G. (2013b). *Styrtflommer og klimaendring* i Bye, L.M., Lein, H. og Rød, J.K. (red.) *Mot en farligere fremtid?* Akademika forlag.

- Virehn, P. L. E. (2014). Water on devious ways - a gis analysis. Master's thesis, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU).
- Vosselman, G., Gorte, B. G., Sithole, G., and Rabbani, T. (2004). Recognising structure in laser scanner point clouds. *International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 46(8):33–38.
- Walberg, N. A. K. and Devoli, G. (2014). Regional varsling av jordskredfare: Analyse av historiske jordskred, flomskred og s/oerpeskred i gudbrandsdalen og ottadalen. *Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE)*.
- Wilson, J. P. (2012a). Digital terrain modeling. *Geomorphology*, 137(1):107–121.
- Wilson, J. P. (2012b). Digital terrain modeling. *Geomorphology*, 137(1):107–121.
- Wilson, J. P. and Gallant, J. C. (2000a). Digital terrain analysis. *Terrain analysis: Principles and applications*, pages 1–27.
- Wilson, J. P. and Gallant, J. C. (2000b). *Terrain analysis: principles and applications*. John Wiley & Sons.
- Wilson, J. P., Lam, C. S., and Deng, Y. (2007). Comparison of the performance of flow-routing algorithms used in gis-based hydrologic analysis. *Hydrological processes*, 21(8):1026–1044.
- xgeo (2013). Nedb/oers/aalinger fra venabu m/aalestasjon.
- Yilmaz, I. (2009). Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, artificial neural networks and their comparison: a case study from Kat landslides (Tokat-Turkey). *Computers & Geosciences*, 35:1125–1138.
- Youssef, A. M., Pradhan, B., and Hassan, A. M. (2011). Flash flood risk estimation along the st. katherine road, southern sinai, egypt using gis based morphometry and satellite imagery. *Environmental Earth Sciences*, 62(3):611–623.
- Yuan, C. (2012). High performance computing for massive lidar data processing with optimized gpu parallel programming. Master's thesis, The University of Texas at Dallas.

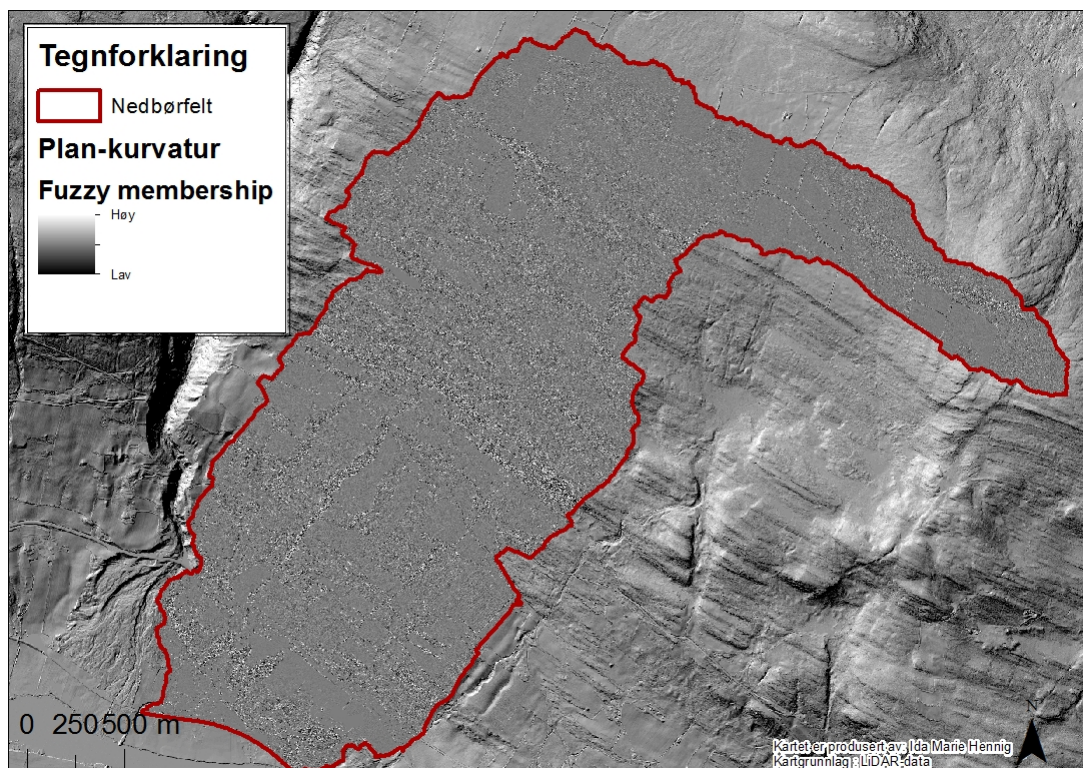
Zhu, A.-X., Wang, R., Qiao, J., Qin, C.-Z., Chen, Y., Liu, J., Du, F., Lin, Y., and Zhu, T. (2014). An expert knowledge-based approach to landslide susceptibility mapping using gis and fuzzy logic. *Geomorphology*, 214:128–138.

Tillegg A

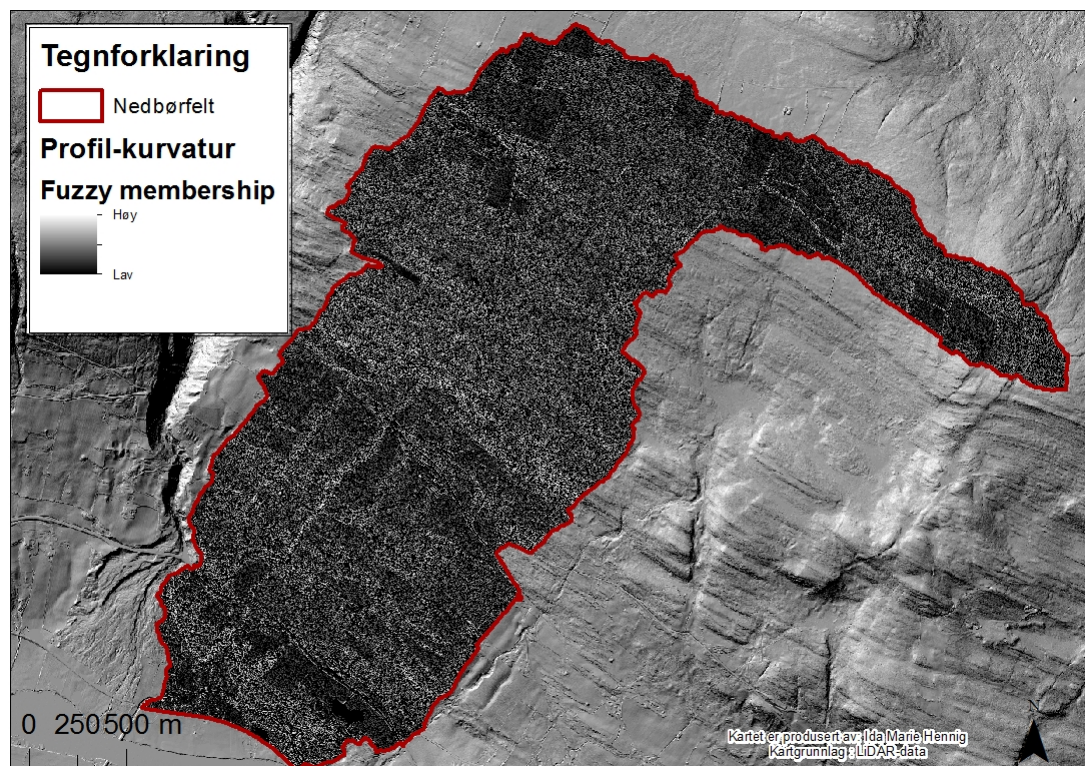
Fuzzy Logic



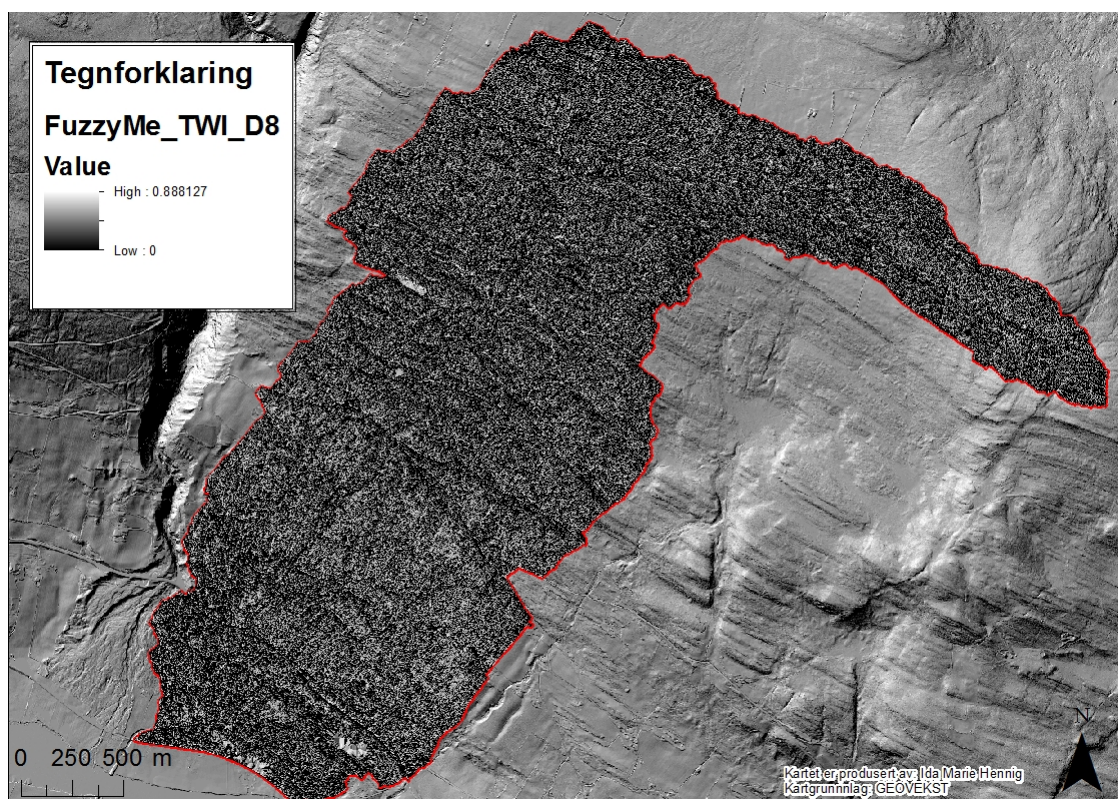
FIGUR A.1: I helningsrasteret indikerer hvite celler høy medlemskapsverdi. Områder som har høyere helning enn gjennomsnitts helningen (11.88 grader) ha større sansynlighet for å bli medlem. Flate områder har fått medlemskapsverdien 0. Kartet viser at der bekkene har erodert ned i løsmassene har høyest medlemskapsverdi.



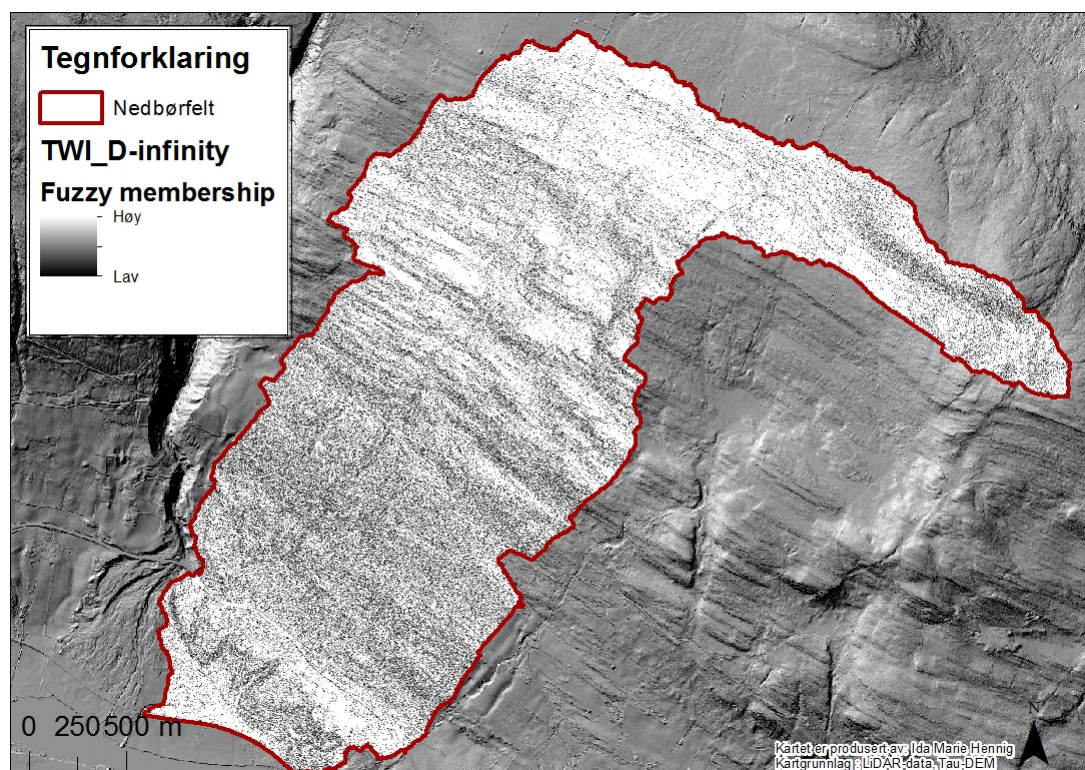
FIGUR A.2: I rasteret som viser medlemskapsverdien til plan-kurvaturen er positive verdier tildelt høy medlemskapsverdi. Konkave celler som indikerer en nedsekning (dal/ravine) er representert med hvite celler.



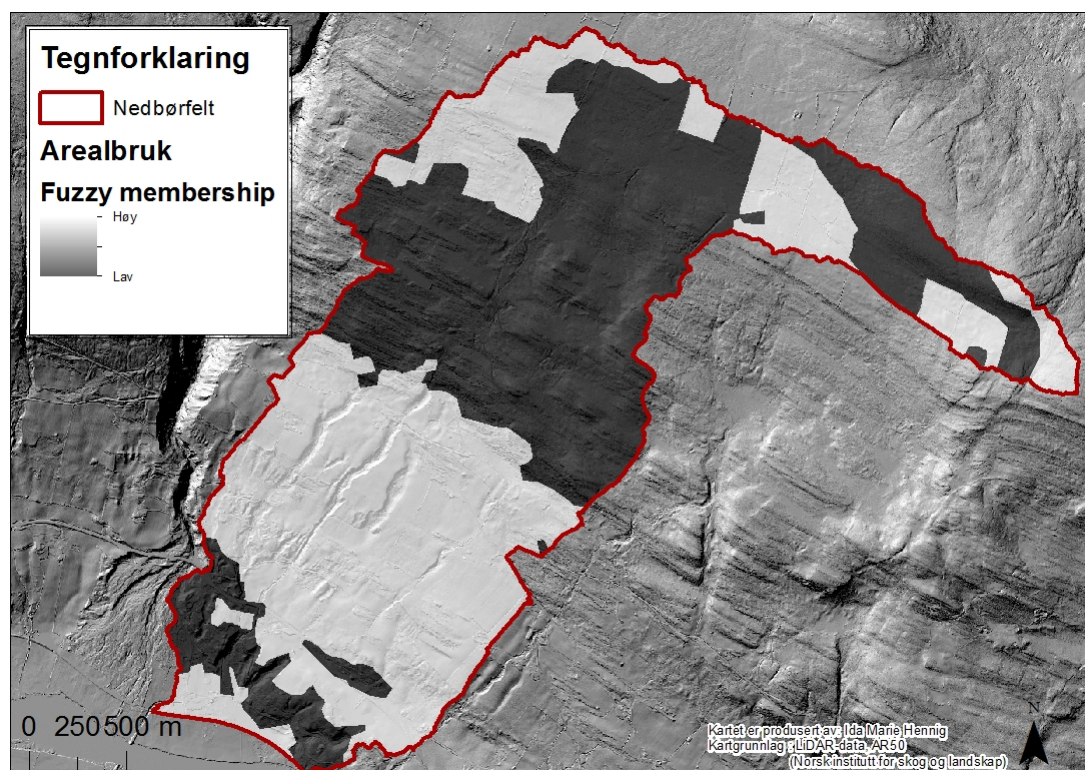
FIGUR A.3: Profil-kurvatur rasteret viser med hvitt celler som er konveks i helningsretningen. De hvite cellene indikerer at området er mer potensielt mer utsatt for skred og har en høy medlemskaps verdi .



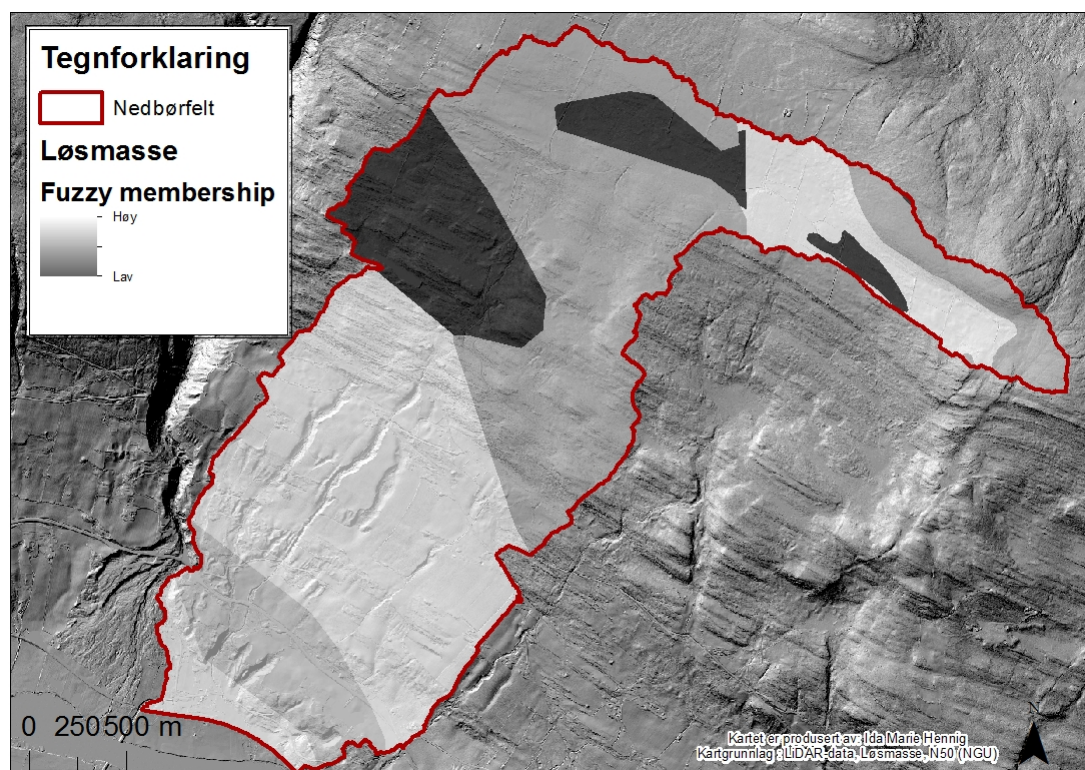
FIGUR A.4: Rasteret som beskriver medlemskapverdien til TWI avledet fra D8 algoritmen gir høy medlemskapverdi til celler som akkumulerer vann. Områder med bekk og flate områder har fått høy medlemskapverdi



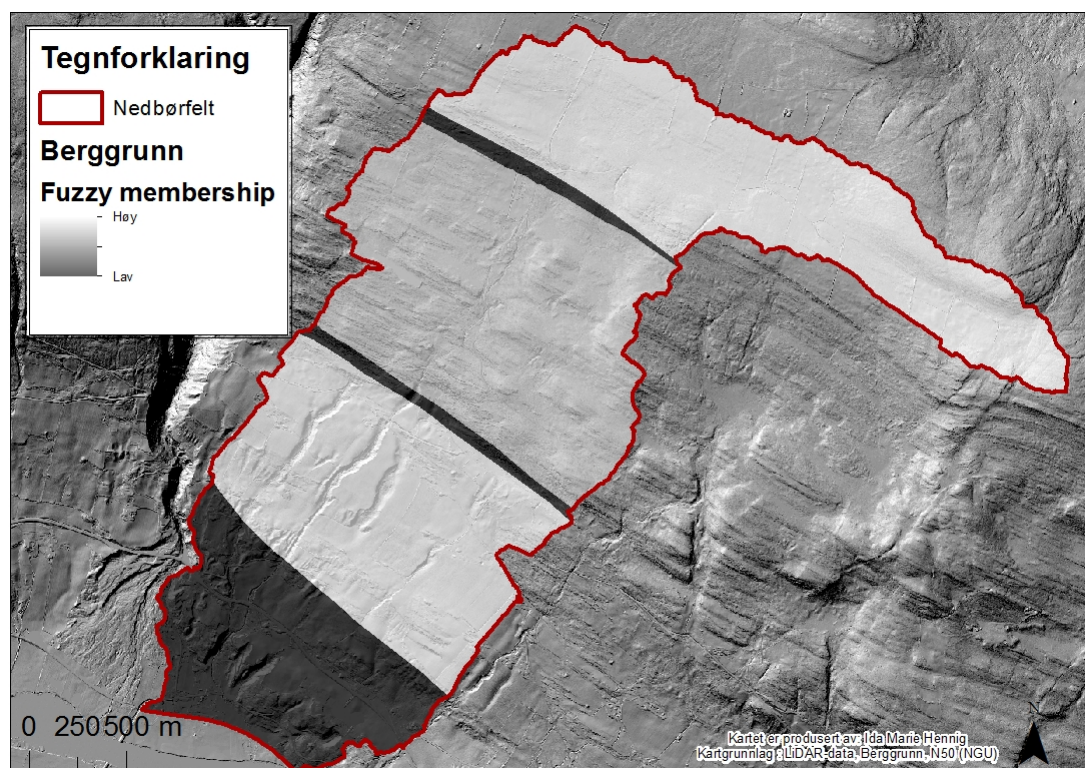
FIGUR A.5: Medlemskapsverdi for TWI rasteret avledet fra D-infinity algoritmen. Rasteret skiller seg fra TWI avledet fra D8 ved at flate områder har fått høyere medlemskapsverdi.



FIGUR A.6: Rasterert over arealbruk har høy medlemskapverdi på jordbruk og snau-
mark. Område med skog, myr, vann og bebyggelse har fått lav medlemskapverdi.



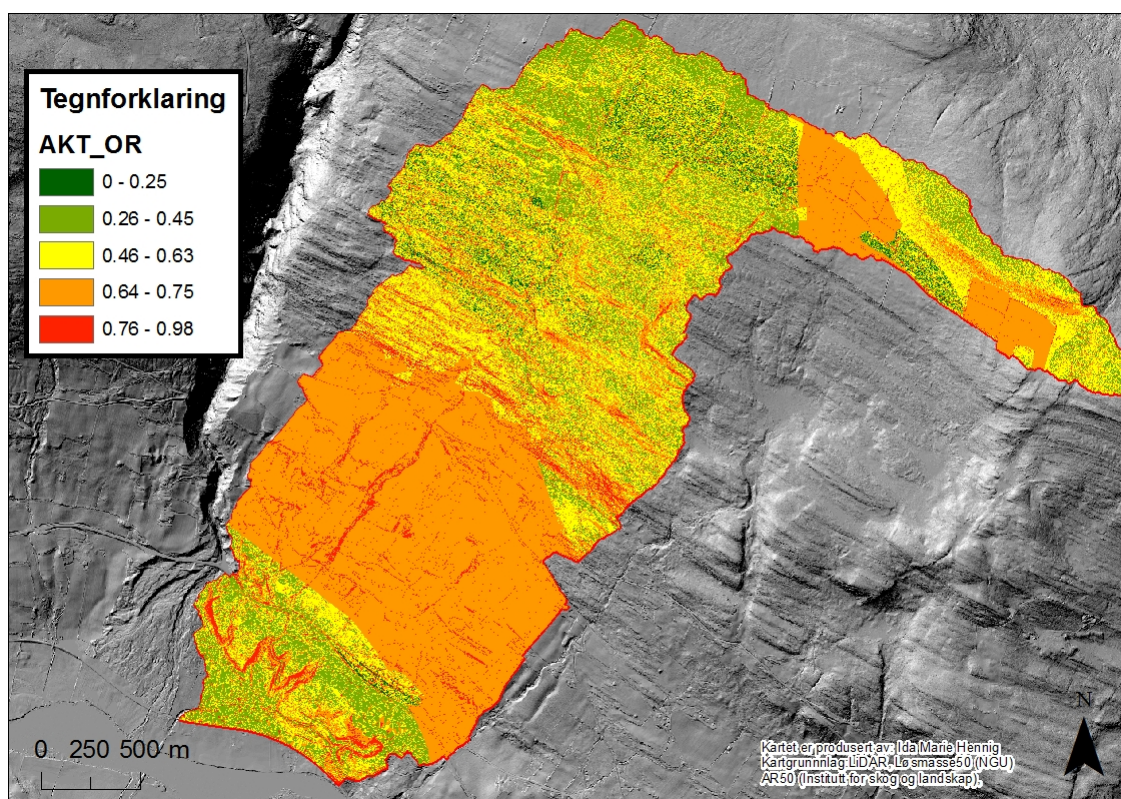
FIGUR A.7: Medlemskapverdiene for løsmassene er gitt på grunnlag av tidligere registrerte skred. Løsmassene med høyest medlemskapverdi er morene materiale med tykt dekke.



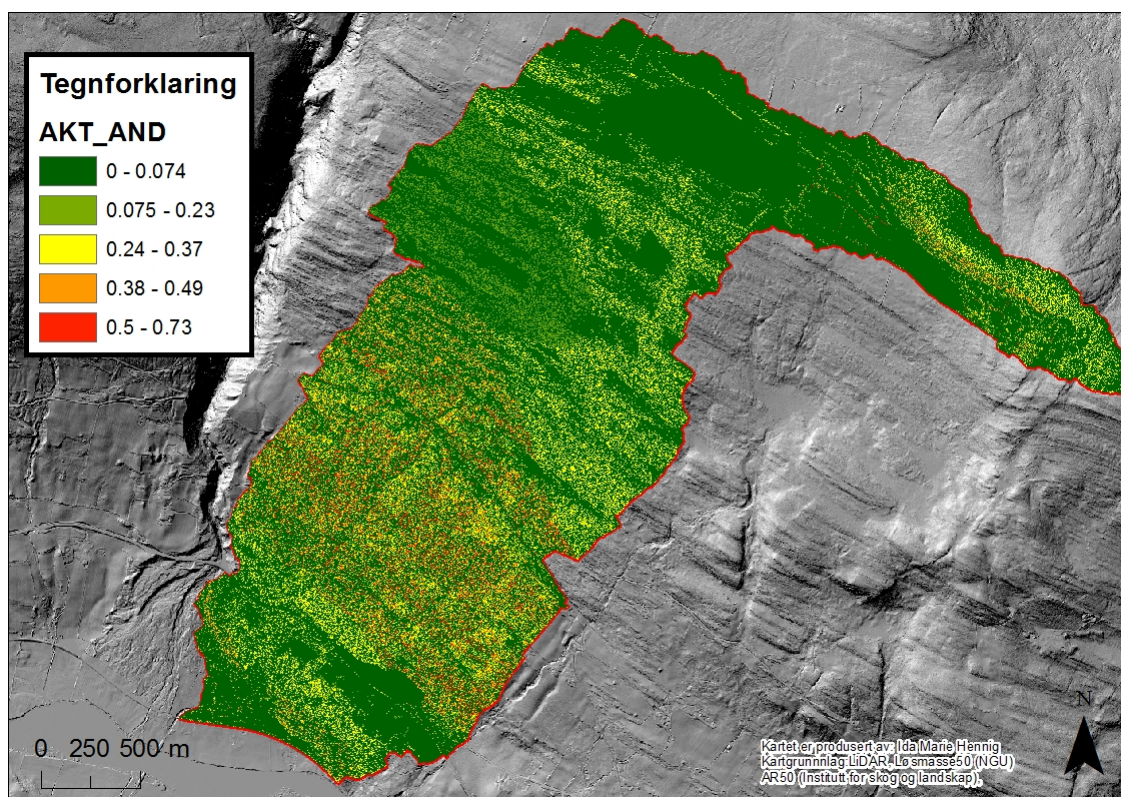
FIGUR A.8: For berggrunnen er det fylltittisk sandstein som har høyest medlemskapverdi. Lavest medlemskapverdi er berggrunn med innslag av skifer.

Tillegg B

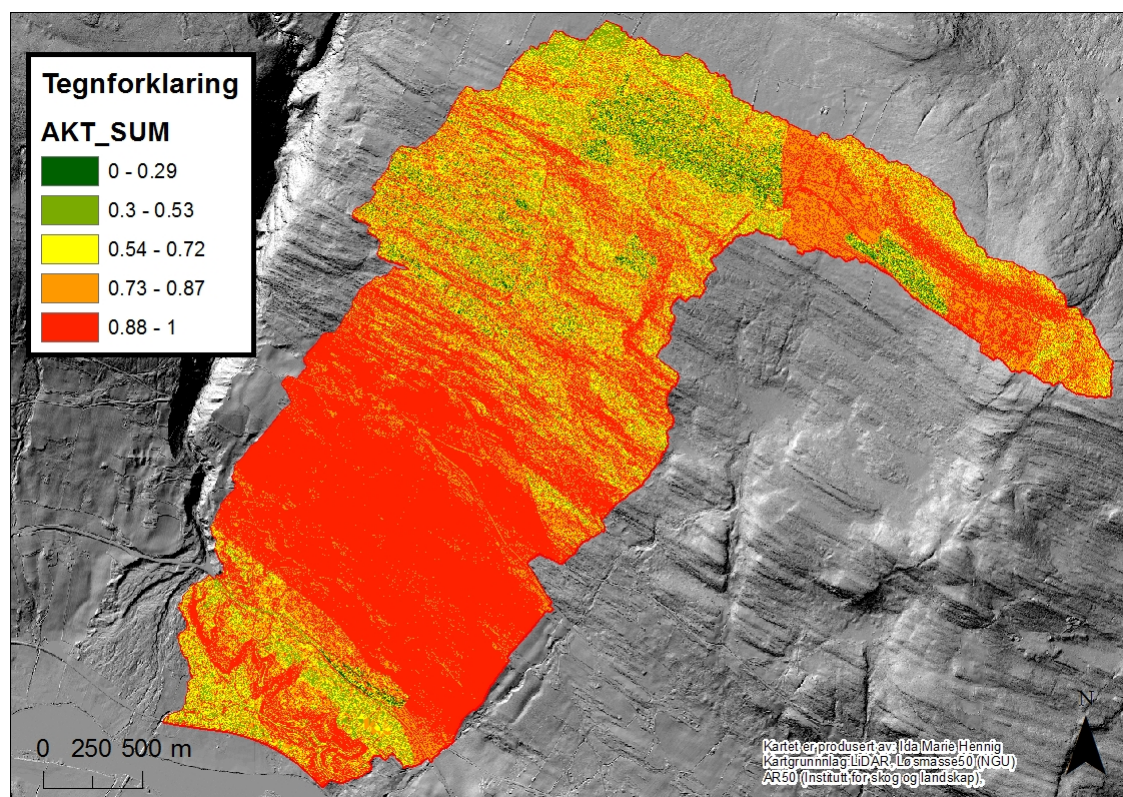
Aktsomhetskart



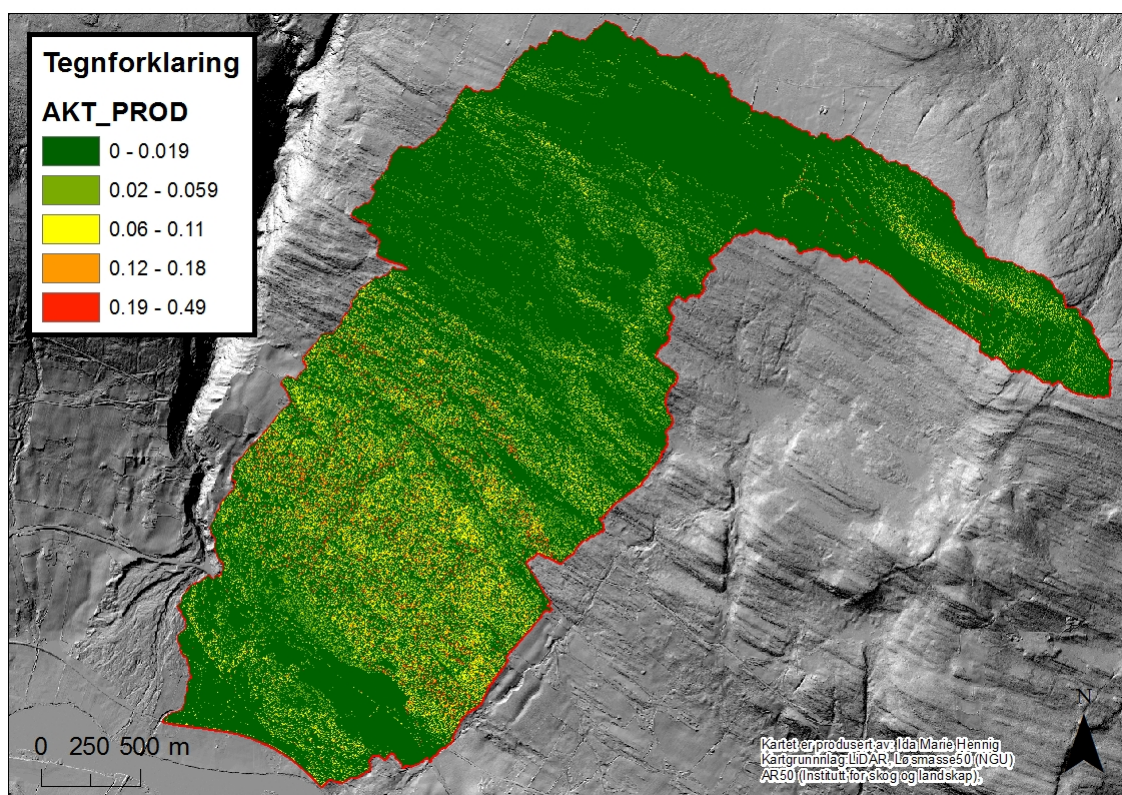
FIGUR B.1: Kart over Brandrudsåas potensielle aktsomhetsområder med bruk av Fuzzy OR. En celle må ha høy medlemskapverdi i samtlige kartlagene i for å oppnå høy aktsomhetverdi i resultatet.



FIGUR B.2: Kart over Brandrudsåas aktsomhetsområder med bruk av Fuzzy AND. En celle kan ha høy medlemskapverdi i kun ett av kartlagene i modellen for å oppnå høy verdi i resultatet.



FIGUR B.3: Kart over Brandrudsåas aktsomhets områder med bruk av Fuzzy AND. Ved medlemskapfunksjonen må en celle ha høy medlemskapverdi i et av inndata for å oppnå høy verdi i resultatet.



FIGUR B.4: Kart over Brandrudsåas aktsomhets områder med bruk av Fuzzy AND. Ved medlemskapfunksjonen må en celle ha høy medlemskapverdi i et av inndata for å oppnå høy verdi i resultatet.