

Jostein Roalkvam

Identifisering av skredfarlige elver og bekker i Trondheim kommune med moderne fjernanalyse - En GIS studie

Masteroppgave i Geografi

Trondheim, mai 2014

Veileder: Jan Ketil Rød

Biveileder: Ivar Berthling

Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet

Fakultet for samfunnsvitenskap og teknologiledelse

Geografisk institutt

Forsidefoto: Rolf Ivar Svensli, kommunikasjonsenheten, Trondheim kommune



Roalkvam, J. (2014). Identifisering av skredfarlige elver og bekker i Trondheim kommune med moderne fjernanalyse. Master Thesis, Department of Geography, NTNU, Trondheim

Abstract

High-resolution spatial data are becoming increasingly available. Such data have many applications and have been in demand for a long time. This paper investigates if we, with the help of a LiDAR-derived terrain model of high spatial resolution, easily accessible fluvial datasets and data on quick clay conditions, can conduct a spatial analysis that identifies rivers and streams that are likely to trigger future quick clay landslides in Trondheim, Norway. Data from the recent quick clay landslide at Byneset in Trondheim in 2012 are used as a basis for the analysis. Both ArcGIS and SPSS have been used in the analysis process, which have led to 73 identified rivers and streams, based on a number of different parameters. These have been classified and ranked on a scale of 1 to 5 on the likelihood of releasing a quick clay landslide. The ones who have been classified as the most likely to trigger landslides are largely located in the same area, just north of Heimdal and Tiller.

Sammendrag

Høyoppløste geografiske data begynner å bli mer og mer tilgjengelig. Slike data har mange bruksområder og har lenge vært etterspurt. Denne oppgaven undersøker om vi med hjelp av en LiDAR-derivert terrengmodell med svært høy oppløsning, lett tilgjengelige fluviale datasett og data om kvikkleireforhold, kan gjennomføre en romlig analyse som identifiserer elver og bekker som har høy sannsynlighet for å utløse fremtidige kvikkleireskred i Trondheim. Data om bekken som utløste kvikkleireskredet på Byneset i 2012 er brukt som grunnlag for analysen. Analysen som er gjennomført i både ArcGIS og SPSS har resultert i en oversikt over elver og bekker innenfor kvikkleireområder i Trondheim, klassifisert og rangert etter en rekke parametere. 73 elver og bekker har blitt identifisert som potensielle skredutløsere. Disse har blitt klassifisert og rangert på en skala fra 1 til 5 etter sannsynlighet for å utløse nye kvikkleireskred. De som har blitt klassifisert som mest sannsynlige skredutløsere befinner seg i stor grad i samme område, rett nord for Heimdal og Tiller.

Forord

Denne oppgaven markerer slutten på fem år som geografistudent ved NTNU. Jeg har i løpet av disse fem årene fått en genuin interesse for geografifaget, og spesielt fagfeltet som omhandler GIS. Prosessen med å skrive denne masteroppgaven har vært krevende men svært lærerik, og jeg tar med meg mye faglig og sosial kompetanse videre ut i arbeidslivet.

Jeg vil rette en stor takk til veileder Jan Ketil Rød som introduserte meg for temaet i denne oppgaven og som gjennom sine forelesninger har bidratt til min interesse for GIS. I tillegg vil jeg takke biveileder Ivar Bethling, og Hans Ola Fredin for god hjelp og oppfølging når jeg trengte det mest. Takk til mamma og pappa for korrekturlesing og tilbakemeldinger på oppgaven, og oppløftende kommentarer underveis i studiet, og ikke minst venner og kjæreste.

Innholdsfortegnelse

Abstract	iii
Sammendrag	iii
Forord.....	v
Innholdsfortegnelse	vii
Figurliste.....	xi
Tabelliste	xv
Akronymer og forkortelser	xvi
1 Innledning	1
1.1 Forskningsspørsmål	3
1.1.1 Overordnet forskningsspørsmål.....	3
1.1.2 Delspørsmål for å besvare hovedspørsmålet.....	4
1.2 Områdebeskrivelse	4
1.2.1 Oppgavens omfang og avgrensning	5
1.2.2 Hendelsesforløp og årsak til skredet på Byneset.....	7
1.3 Tidligere arbeid	9
1.4 Oppgavens oppbygning	9
2 Teori og metode	11
2.1 Naturgeografisk teori	11
2.1.1 Kvikkleire.....	11
2.1.2 Erosjon.....	13
2.2 Geografiske Informasjonssystem (GIS).....	15
2.2.1 Grunnleggende prinsipper	15
2.2.2 Terrengmodell.....	15
2.2.3 Oppløsning	16
2.2.4 Interpolering og generalisering.....	17
2.3 LiDAR.....	20

2.4	Analytiske teknikker	22
2.4.1	Analyse i ArcGIS	23
2.4.2	Analyse i SPSS Statistics	27
3	Datagrunnlag og bearbeiding	29
3.1	Kartlegging av nødvendige data	29
3.2	Innsamling av data	30
3.3	Evaluering av kilde-data	31
3.3.1	LiDAR Punktsky	31
3.3.2	Data om fluviale systemer	31
3.3.3	Kvikkleiresoner og grunnkart	35
3.4	Bearbeiding av data i ArcGIS	36
3.4.1	Interpolering av LiDAR punktsky til terrengmodell	37
3.4.2	Fra flater til linjer	43
3.4.3	Terrengkarakterisering av elver og bekker	49
3.4.3.1	Gjennomsnittlig helling / skråning	50
3.4.3.2	Ruhet	51
3.4.3.3	Sinusitet	52
3.4.3.4	Knekkpunkt	52
3.4.4	Normalisering av variablene	53
3.4.5	Beregning av lengde innenfor faresoner	54
3.5	Oppsummering	56
4	Resultater og analyse	59
4.1	Første delanalyse: Gruppering av like elver og bekker	61
4.1.1	Tolking av resultatene fra første delanalyse	69
4.2	Andre delanalyse: Ranging av skredfarlige elver og bekker	72
4.2.1	Tolking av resultater fra andre delanalyse	78
5	Diskusjon	81

5.1	Evaluering av datagrunnlag og analysevariabler	81
5.1.1	<i>Feilkilder knyttet til det fluviale datasettet.....</i>	<i>82</i>
5.1.2	<i>Feilkilder knyttet til terrengmodellen.....</i>	<i>87</i>
5.2	Begrunnelse for analysekriterier	89
5.2.1	<i>Antall grupper</i>	<i>90</i>
5.2.2	<i>Initialiseringsmetode.....</i>	<i>91</i>
5.2.3	<i>Delanalyse 2, og egen klassifisering.....</i>	<i>92</i>
5.2.4	<i>Fordeler og ulemper med bruk av verktøy i ArcGIS og SPSS</i>	<i>93</i>
5.3	Evaluering av analysemetode og resultater	93
5.3.1	<i>Klyngeanalyse som verktøy.....</i>	<i>94</i>
5.3.2	<i>Evaluering av resultatene.....</i>	<i>95</i>
6	Konklusjon.....	97
6.1	<i>Avsluttende bemerkninger</i>	<i>98</i>
	Referanseliste	101

Figurliste

Om ikke annet er oppgitt er kildedata for kart i figurene listet under fra Trondheim kommune, Statens Kartverk og NVE.

Figur 1.1: Oversiktsbilde fra kvikkleireskredet på Byneset. Foto: Rolf Ivar Svensli, kommunikasjonsenheten, Trondheim kommune	1
Figur 1.2: Marine avsetninger i Trondheim kommune. Dette kartet gir en indikasjon på hvor store deler av Trondheim som var under vann etter den siste istid. Datakilder: Trondheim kommune, Statens Kartverk og NGU.	5
Figur 1.3: NVEs kartlagte kvikkleiresoner, klassifisert etter faregrad (sannsynlighet for skred). Datakilder: Trondheim kommune, Statens Kartverk, NGU og NVE.	6
Figur 1.4: Oversikt over skredområdet ved Esp på Byneset, før og etter skredet i 2012. Datakilder: Trondheim kommune, Statens Kartverk, Norge i bilder og Google Maps.	8
Figur 2.1: Kvikkleire, før, under og etter skred. Kilde: Reitan 2011.....	12
Figur 2.2: En visuell presentasjon av hvordan et kvikkleireskred kan utvikle seg fra erosjon, via initialras til et stort skred. Kilde: Vorren et al. 2007.....	12
Figur 2.3: Hjulströms kurve. Kilde: Sulebak 2007.	14
Figur 2.4: Forskjellen mellom en overflatemodell (venstre) og en terrengmodell (høyre). Kilde: Agarwal et al. 2013.	16
Figur 2.5: En visuell fremstilling av hvordan IDW fungerer. Det gule punktet har en ukjent verdi som vi vil finne ut av. De røde punktene er kjente verdier som IDW bruker for å beregne verdi fra, innenfor søkeområdet som er den gule sirkelen. Kilde: ESRI 2013a.....	18
Figur 2.6: En forenklet illustrasjon av hvilke komponenter som utgjør et fly-basert LiDAR-system. INS er det samme som IMU. Kilde: Kao et al. udatert.....	20
Figur 2.7: En visuell fremstilling av retursignalene fra en laserstråle. Kilde: e-Education/ASPRS udatert.	21
Figur 2.8: En visuell fremstilling av hvordan K-Means algoritmen gjennom flere gjentakelser kommer frem til de endelige klyngene. Kryssene indikerer det aktuelle objektet som fungerer som frø. Kilde: Pandre 2011.	24
Figur 2.9: Tre av de viktigste elementene i rapporten til resultatene ved bruk av Grouping Analysis verktøyet i ArcGIS. Gruppevis oppsummering (a). Parallell boksplot graf som oppsummerer gruppene visuelt (b). Kalkulert pseudo F-indeks for 2 til 15 grupper (c). Se ESRI 2014b for mer utfyllende figurer og beskrivelse.	26

Figur 3.1: Forskjellen i oppløsningen til de to fluviale datasettene kommer godt frem når de legges over terrengmodellen.	32
Figur 3.2: Begge de fluviale datasettene mangler elver og bekker.	33
Figur 3.3: Her vises forskjellene mellom det fluviale datasettet fra FKB (a) og det som ble prøvd kalkulert ut fra terrengmodellen (b). Begge kartene er fra samme område.	34
Figur 3.4: Flytdiagram som viser en grov forenkling av bearbeidingsprosessen, fra kildemateriell til ferdig bearbeidet datasett klart for analyse.	37
Figur 3.5: Kalkulert statistikk for punktskyen som dekker Trondheim kommune.	39
Figur 3.6: Ferdig interpolert terrengmodell. Hvert røde rektangel representerer én LAS-fil. De mørkeblå feltene viser de cellene i terrengmodellen som befinner seg under havnivå.	40
Figur 3.7: Statistisk informasjon for punktskyen. Her vises punkttettheten til punktskyen. Minste, største og gjennomsnittlig punktavstand.	41
Figur 3.8: Hvert punkt i grafen representerer én enkelt LAS fil. Her vises sammenhengen mellom antall punkter og punktavstand, i de ulike LAS-filene.	41
Figur 3.9: Et utsnitt av den filtrerte punktskyen, visualisert i ArcGIS.	42
Figur 3.10: Manuell fjerning av utstikkende linjesegmenter. Figuren til venstre viser resultatet fra verktøyet som genererer senterlinjer. Figuren til høyre viser senterlinjene etter manuell bearbeiding.	45
Figur 3.11: Manuell generering av senterlinjer som det automatiserte verktøyet ikke klarte å lage. Knekkpunkter blir lagt til den eksisterende linjen oppe til høyre i figuren til venstre, og ned til linjen til venstre i figurene.	46
Figur 3.12: Fjerning av uekte noder med verktøy i ArcGIS. Røde punkter markerer uekte noder og deler i praksis linjene opp i to uavhengige linjesegmenter. Grønne punkter er knekkpunkter som definerer linjenes form.	47
Figur 3.13: Det fluviale datasettet, ferdig konvertert fra flater til linjer, og slått sammen med det de resterende linjene fra FKB, og visualisert over den ferdig interpolerte terrengmodellen.	49
Figur 3.14: Forskjellen mellom terrenglengde og flat lengde.	51
Figur 3.15: Denne figuren viser hvorfor en elv eller bekk kan ha en høy verdi på variabelen for sinusitet og samtidig en lav verdi på knekkpunktvariabelen, og omvendt. Elven til venstre vil ha et høyt antall knekkpunkt men lav sinusitet. Det motsatte er tilfelle for elven til høyre.	53

Figur 3.16: Attributt-tabellen med verdier som beskriver prosentandel av lengden på elvene og bekkene som ligger innenfor kvikkleiresoner med fareklasse 1, 2 og 3. Faresone0 indikerer prosentandel som ligger utenfor kvikkleiresoner.	55
Figur 3.17: Elver og bekker som beveger seg innenfor en eller flere av NVE og NGIs kvikkleiresoner, klassifisert etter skredfaregrad.	57
Figur 4.1: Området hvor skredet på Byneset ble utløst, med den utløsende bekken markert med rød farge. Skred- og utløpsområde med henholdsvis gul og blå skravurfarge.	59
Figur 4.2: Lengdeprofilen til bekken som utløste skredet på Byneset.....	60
Figur 4.3: Resultat fra Grouping Analysis i ArcGIS (3 grupper, bekken på Byneset som frø). Se også tabell 4.2.	63
Figur 4.4: Resultat fra Grouping Analysis i ArcGIS (15 grupper, bekken på Byneset som frø). De ulike fargene på elvene og bekkene indikerer gruppetilhørighet med ulike gruppekriterier. Se også tabell 4.3.	64
Figur 4.5: Resultat fra Grouping Analysis i ArcGIS (15 grupper, frø plukket tilfeldig ut). De ulike fargene på elvene og bekkene indikerer gruppetilhørighet med ulike gruppekriterier. Se også tabell 4.4.	66
Figur 4.6: Resultat fra K-Means Cluster analyse i SPSS (3 grupper).....	68
Figur 4.7: Resultat fra TwoStep Cluster analyse i SPSS (3 grupper).	69
Figur 4.8: Parallell boksplot som viser gjennomsnittsverdien på hver variabel for hver gruppe. (fra rapporten til Grouping Analysis i ArcGIS, med 3 grupper og bekken på Byneset som frø). Gruppen til bekken på Byneset er her representert med blå farge.	70
Figur 4.9: Parallell boksplot som viser gjennomsnittsverdien på hver variabel for hver gruppe (fra rapporten til Grouping Analysis i ArcGIS, med 15 grupper og bekken på Byneset som frø). Gruppen til bekken på Byneset er her representert med lys blå farge. Gruppe 5, 9 og 11 med henholdsvis lilla, mørk blå og grønn farge.	71
Figur 4.10: Parallell boksplot som viser gjennomsnittsverdien på hver variabel for hver gruppe (fra rapporten til Grouping Analysis i ArcGIS, med 15 grupper og tilfeldig utplukk av frø). Gruppen til bekken på Byneset her representert med mørk blå farge. Gruppe 2,4 og 5 med henholdsvis rød, gul og lilla farge.....	72
Figur 4.11: Resultat fra Grouping Analysis i ArcGIS (prosentandel innenfor faresone)	73
Figur 4.12: Resultat fra Grouping Analysis i ArcGIS (prosentandel innenfor faresone og konsekvensgrad)	74

Figur 4.13: Resultat fra Grouping Analysis i ArcGIS (prosentandel innenfor faresone, konsekvensgrad, og gruppetilhørighet fra delanalyse 1). NEA er en forkortelse for Nidelven.	76
Figur 4.14: Resultatet fra delanalyse 1, rangert etter NVE og NGI klassifisering av kvikkleiresonene for skredrisiko.....	78
Figur 5.1: Spredningsplot med skråning- og knekkpunktvariablene visualisert. Hvert objekt representerer en elv eller bekk, mens de unike fargene representerer gruppetilhørighet.	83
Figur 5.2: Spredningsplot med skråning- og knekkpunktvariablene visualisert. Objekter med turkis farge representerer elver og bekker som er blitt konvertert fra flater til linjer, mens grå objekter har vært linjer hele tiden og ikke blitt bearbeidet (se kapittel 3.4.2).	84
Figur 5.3: Det er en svært sterk positiv korrelasjon mellom ruhet- og skråningsvariablene. Elvene og bekkene er imidlertid spredt utover nesten hele skalaen til begge variablene. Det er imidlertid en høy konsentrasjon på den nedre delen av skalaen.	85
Figur 5.4: Terrengavstanden øker i takt med skråningsverdien på grunn av Pytagoras' setning. Blå farge representerer her vannveien, mens brun farge representerer terrenget.	86
Figur 5.5 Objektene er stort sett konsentrert på den nedre skalaen av både variablene for ruhet og sinusitet. Det er heller ingen nevneverdig korrelasjon mellom disse to variablene.....	87

Tabelliste

Tabell 3.1: NVE og NGIs Kriterier for faregrad- og konsekvensklassifisering av kvikkleiresoner. Kilde: Gregersen 2008	36
Tabell 3.2: En oversikt over de kalkulerte variablene brukt i analysen, og hva verdiene indikerer.	56
Tabell 4.1: Karakteristikkene til bekken som utløste skredet på Byneset.	60
Tabell 4.2: Resultat fra Grouping Analysis (3 grupper, bekken på Byneset som frø. Se figur 4.3).	63
Tabell 4.3: Resultat fra Grouping Analysis (15 grupper, bekken på Byneset som frø. Se figur 4.4).	65
Tabell 4.4: Resultat fra Grouping Analysis (15 grupper, ingen valgte frø. Se figur 4.5).	67
Tabell 4.5: Resultat fra SPSS. Gruppekriteriene for gruppen til bekken på Byneset.	68
Tabell 4.6: Klassifiseringskriterier for resultatene i figur 4.11 og 4.12. Prosentandel angir hvor stor prosent av den totale elve- eller bekkelengden som ligger innenfor de respektive faresonene (gjennomsnittlig verdi for de sammengrupperte elvene og bekkene).	75
Tabell 4.7: Klassifisering av resultatene i figur 4.13. Prosentandel angir hvor stor prosent av den totale elve- eller bekkelengden som ligger innenfor de respektive faresonene (gjennomsnittlig verdi for de sammengrupperte elvene og bekkene).	77

Akronymer og forkortelser

GIS	Geografiske informasjonssystemer
LiDAR	Light Detection and Ranging
GPS	Global Positioning System
IMU	Inertial Measuring Unit
TIN	Triangulated Irregular Network
FKB	Felles Kartdatabase
NVE	Norges vassdrags- og energidirektorat
NGI	Norges geotekniske Institutt
NGU	Norges geologiske undersøkelse

1 Innledning

Norges historie er preget av mange og voldsomme naturkatastrofer opp igjennom årene. Den vanligste formen for naturkatastrofe i Norge er skred (Furseth 2006), og i løpet av de siste 150 årene har så mange som 2000 mennesker omkommet i skredulykker, utløst av både naturlige årsaker og av menneskelig aktivitet (Jaedicke et al. 2009). Faktisk har om lag 800 mennesker mistet livet bare i Trøndelag, som følge av leirfall og jordskred (Furseth 2006).

I deler av Norge har landhevingen etter den siste istid ført til at nytt lavland har dukket opp. Dette har ført til at det bygges og ferdes i områder hvor det er store forekomster av kvikkleire, og en av de desidert største naturkatastrofene vi har kjennskap til i Norge, var et leirskred i Gauldalen i 1345, hvor om lag 500 mennesker mistet livet og 48 gårder gikk tapt (Furseth 2006; Reite et al. 1999). De aller fleste omkom i dette skredet som følge av den enorme flodbølgen med vann og slam som kom noen dager etter selve leirfallet, når leirmassene som hadde demmet opp hele Gaula elva brast (Furseth 2006).



Figur 1.1: Oversiktsbilde fra kvikkleireskredet på Byneset. Foto: Rolf Ivar Svensli, kommunikasjonsenheten, Trondheim kommune

Kvikkleireskred utgjør fremdeles en trussel i mange områder, og vi hører ofte i media om feilslått planlegging, bygging i usikre områder, og utløste leirskred (Ekroll 2013; Carstens 2012; Mællingsæter 2011).

Trøndelag er sammen med Sørøstlandet de områdene i Norge hvor vi har størst forekomster av marine avsetninger og kvikkleire, og det er i disse områdene vi finner flesteparten av de største og viktigste registrerte leirskredene i Norges historie (Vorren et al. 2007; Furseth 2006). Mange av disse skredhendelsene har vært innenfor kommunegrensene i Trondheim (Furseth 2006; Reite et al. 1999), og det siste store skredet ble utløst så nylig som første nyttårsdag 2012. Dette skredet som ble utløst på Byneset øst i Trondheim (figur 1.1 og 1.4) omtales av NVE (Norges Vassdrags- og Energidirektorat) (2012), som relativt stort og naturlig utløst. Det var heldigvis ingen mennesker som omkom, og heller ingen hus som gikk tapt (NVE 2012).

Byneset er bare ett av flere områder i Trondheim hvor det finnes kvikkleire. Siden den siste istid har Trondheim opplevd en landheving på drøye 170 meter. Dette betyr at vi finner marine avsetninger, og dermed også mulighet for kvikkleire høyt over dagens havnivå, og sjansen for at menneskeliv vil gå tapt i fremtidige leirskred er ansett som relativt høy (Reitan 2012).

Ved hjelp av moderne teknologi og programvare er det imidlertid mulig å foreta romlige analyser for å forutsi og kartlegge hvor nye skred kan finne sted, og NVE har allerede iverksatt et omfattende kartlegging- og klassifiseringsprosjekt for å identifisere områder som er utsatt for blant annet kvikkleireskred (Gregersen 2008). Dette har resultert i en nasjonal skredatabase hvor utsatte områder har blitt klassifisert basert på en rekke parametere (NVE 2014; Gregersen 2008).

Denne oppgaven undersøker om og hvordan vi, med hjelp av geografiske data av høy kvalitet og analyseverktøy i et GIS, kan gjennomføre en analyse av et større område for å identifisere mulige utløsende årsaker til kvikkleireskred. Det er mange ulike måter å gripe an en slik oppgave og mange faktorer å ta hensyn til for å få til en så realistisk forutsigelse som mulig. Slike faktorer kan for eksempel være karakteristikker til området elver og bekker, ulike løsmasser som finnes i områdene, topografiske og geomorfologiske karakteristikker, tidligere forekomster av skred, og ikke minst menneskelig aktivitet. Jeg har av tidshensyn valgt å avgrense denne oppgaven til noen få faktorer. Jeg kommer i all hovedsak til å ta for meg noen av karakteristikkene til Trondheims mange elver og bekker, innenfor de områdene vi i dag vet at det finnes kvikkleire, og sammenligne disse med data fra kvikkleireskredet på Byneset.

I den foreløpige rapporten til NVE (2012) som omhandler dette skredet, antas det at erosjon i en relativt liten bekk tilhørende dreneringsfeltet Ristbekken var den utløsende årsaken til skredet. Det er da nærliggende å anta at elver og bekker med lignende karakteristikk som den på Byneset under de samme forholdene kan være potensielle skredutløsere.

Selv om menneskelig aktivitet er en stor årsak til kvikkleireskred (Berthling 2013; Sulebak 2007), vil jeg i denne oppgaven hovedsakelig fokusere på naturlige årsaker, siden disse er enklere å kvantifisere. En naturlig årsak til skred, som ofte trekkes frem er erosjon i elver og bekker, for eksempel ved store nedbørsmengder og snøsmelting (Sulebak 2007). Berthling (2013) argumenterer også for at menneskets påvirkning av klimaet kan gjøre at grøfter, stikkrenner og lignende etter hvert vil bli underdimensjonerte og med økt fare for overvannsflo, som igjen kan øke skredfaren i spesielt utsatte områder. Dette vil imidlertid kreve omfattende flommodellering for å analysere, og jeg vil derfor kun basere oppgaven på foreliggende data, og som nevnt naturlige årsaker.

1.1 Forskningsspørsmål

Under har jeg formulert en problemstilling som jeg gjennom oppgaven skal prøve å besvare. Jeg har videre delt det overordnede spørsmålet inn i tre delspørsmål som skal gjøre det lettere å besvare hovedspørsmålet, og konkludere oppgaven.

1.1.1 Overordnet forskningsspørsmål

Kan vi, ved hjelp av høyoppløste terrengdata og andre lett tilgjengelige data, gjennomføre en analyse i et GIS, som identifiserer hvilke elver og bekker som har størst sannsynlighet for å utløse fremtidige kvikkleireskred i Trondheim, basert på data om tidligere skred?

1.1.2 Delspørsmål for å besvare hovedspørsmålet

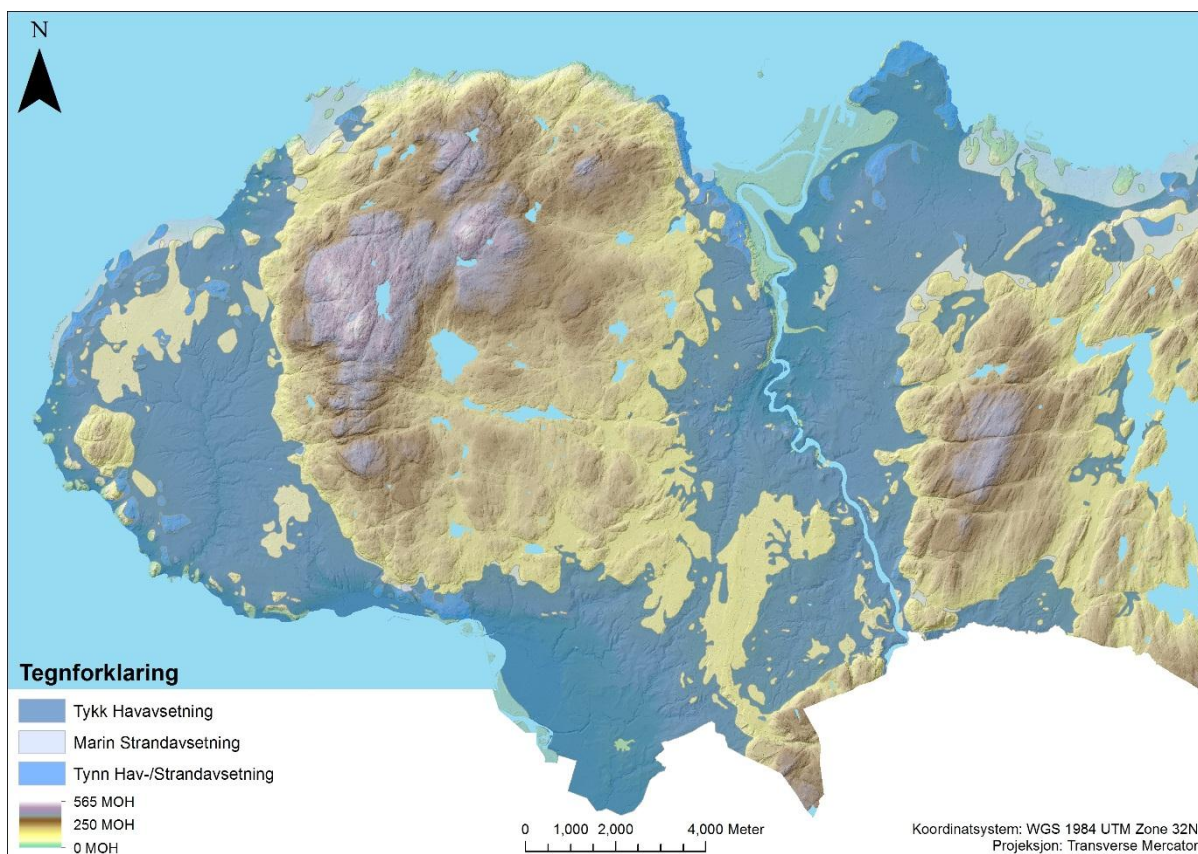
- 1. Hvordan kan relevante kjennetegn ved bekken som utløste skredet på Byneset representeres som sammenlignbare variabler i en analyse?*
- 2. Hvordan kan man gjennomføre en analyse av elvene og bekkene i Trondheim, for å identifisere elver og bekker som har karakteristikk som kan føre til utløsning av nye kvikkleireskred?*
- 3. Er en slik analyse god nok til å bruke som grunnlag for aktsomhetskartlegging for fremtidige kvikkleireskred?*

1.2 Områdebeskrivelse

Området jeg har valgt å studere er Trondheim kommune. Grunnen til at jeg har valgt Trondheim er at dette er et av de stedene i landet med høyest forekomst av marine avsetninger og kvikkleire. Siden den siste istid for om lag 12 000 år siden, har Trøndelag hatt en landheving på om lag 170 meter (Vorren et al. 2007). Dette er fordi innlandsisen presset jordoverflaten betraktelig ned over mange tusen år. Når isen smeltet, ble store mengder løsmasser avsatt i havet som den gang hadde et høyere relativt nivå enn i dag (Bjerrum 1955; Holmsen 1953). Den påfølgende landhevingen siden den gang gjør at vi nå finner marine avsetninger langt over dagens havnivå (se figur 1.2). I tillegg til dette er store deler av Trondheimsområdet flatt lavland, noe som legger grunnlag for store forekomster av kvikkleire (Vorren et al. 2007; Reitan 2012).

Store deler av områdene med marine avsetninger og kvikkleire er tett bebygd (se figur 1.3), og eventuelle skred vil kunne få katastrofale følger både i umiddelbar nærhet, men også områdene rundt, på grunn av indirekte årsaker som oppdemming og påfølgende flodbølger, sperring av infrastruktur o.l.

Jeg har valgt å bruke skredet på Byneset i 2012 som referanse. Det er i hovedsak parametere fra dette området og årsaken til dette skredet som vil bli brukt som sammenligningsgrunnlag for analysen i denne oppgaven. Grunnen til dette er at bekken som utløste skredet er kartlagt og digitalisert før skredet ble utløst. Vi kan med andre ord finne ut hvilke karakteristikk denne bekken hadde, før skredet ble utløst.



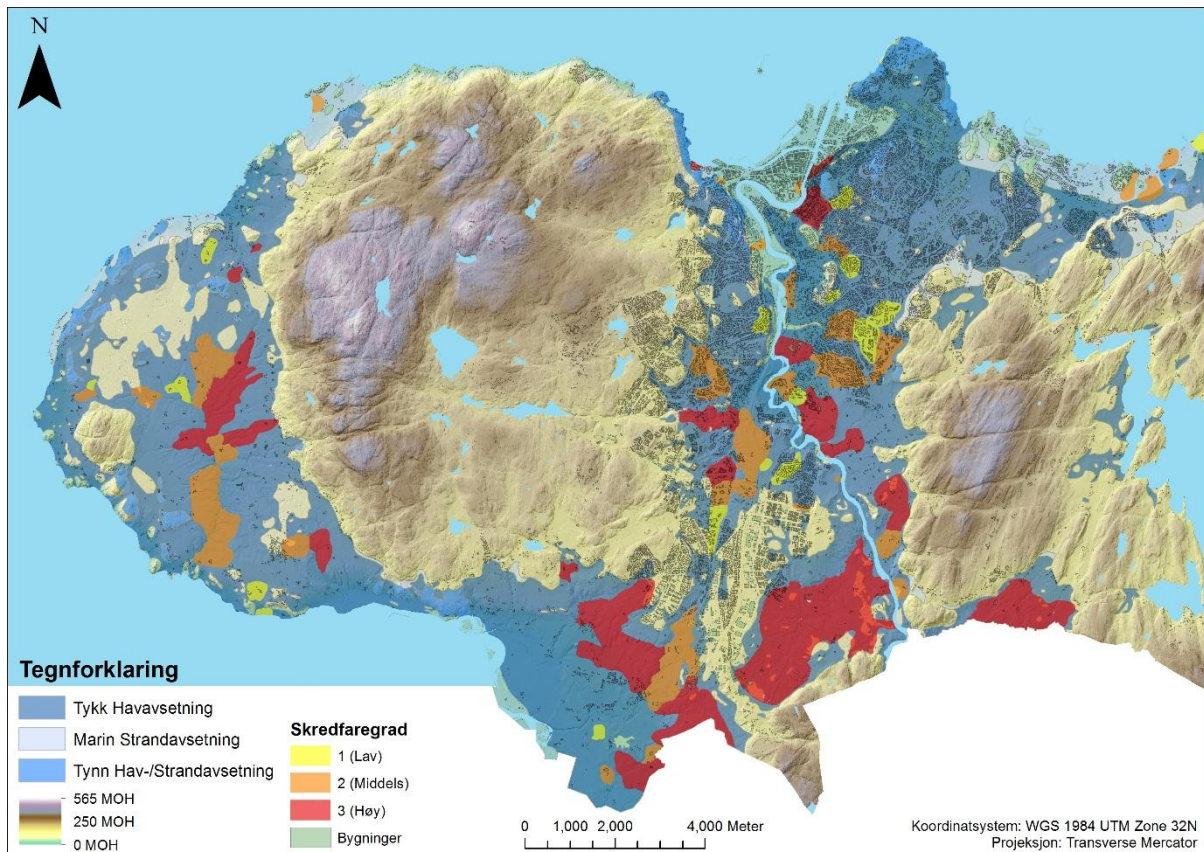
Figur 1.2: Marine avsetninger i Trondheim kommune. Dette kartet gir en indikasjon på hvor store deler av Trondheim som var under vann etter den siste istid. Datakilder: Trondheim kommune, Statens Kartverk og NGU.

1.2.1 Oppgavens omfang og avgrensning

Ettersom kvikkleire er avgrenset til områder med marine avsetninger vil naturligvis studieområdet mitt begrense seg til nettopp disse områdene. I tillegg er det ikke alle disse områdene som har kvikkleire. NGU (1999) påpeker i tidsskriftet Gråsteinen, at påvisning av kvikkleiresoner i de marine områdene er en viktig faktor i kartlegging og vurdering av skredfare langs vassdrag. NVE (2014) har allerede kartlagt en stor del av kvikkleireområdene i Trondheim. Disse områdene vil derfor danne det endelige studieområdet for oppgaven, som vist på kartet i figur 1.3. De kartlagte kvikkleiresonene er på kartet i figur 1.3 rangert etter det NVE og NGI kaller for faregrad. Kort fortalt definerer NVE fare som sannsynligheten for skred (Gregersen 2008). Hvilke parametere som ligger til grunn for denne klassifiseringen forklares i nærmere detalj i kapittel 3.3.3. Som en ser er det en ganske stor del av områdene med marine avsetninger som er klassifisert som kvikkleiresoner. Samtidig er det store områder som ikke

har blitt klassifisert for kvikkleire. Dette har å gjøre med prosessen som gjør leire «kvikk», og forklares nærmere i kapittel 2.1.1.

Oppgaven baserer seg på eksisterende data for Trondheim kommune, og det har ikke blitt utført noen feltundersøkelser eller egen datafangst. Dette fordi oppgaven i all hovedsak undersøker hva som er gjennomførbart med foreliggende data, og fordi områdene med kvikkleire er svært store.



Figur 1.3: NVEs kartlagte kvikkleiresoner, klassifisert etter faregrad (sannsynlighet for skred). Datakilder: Trondheim kommune, Statens Kartverk, NGU og NVE.

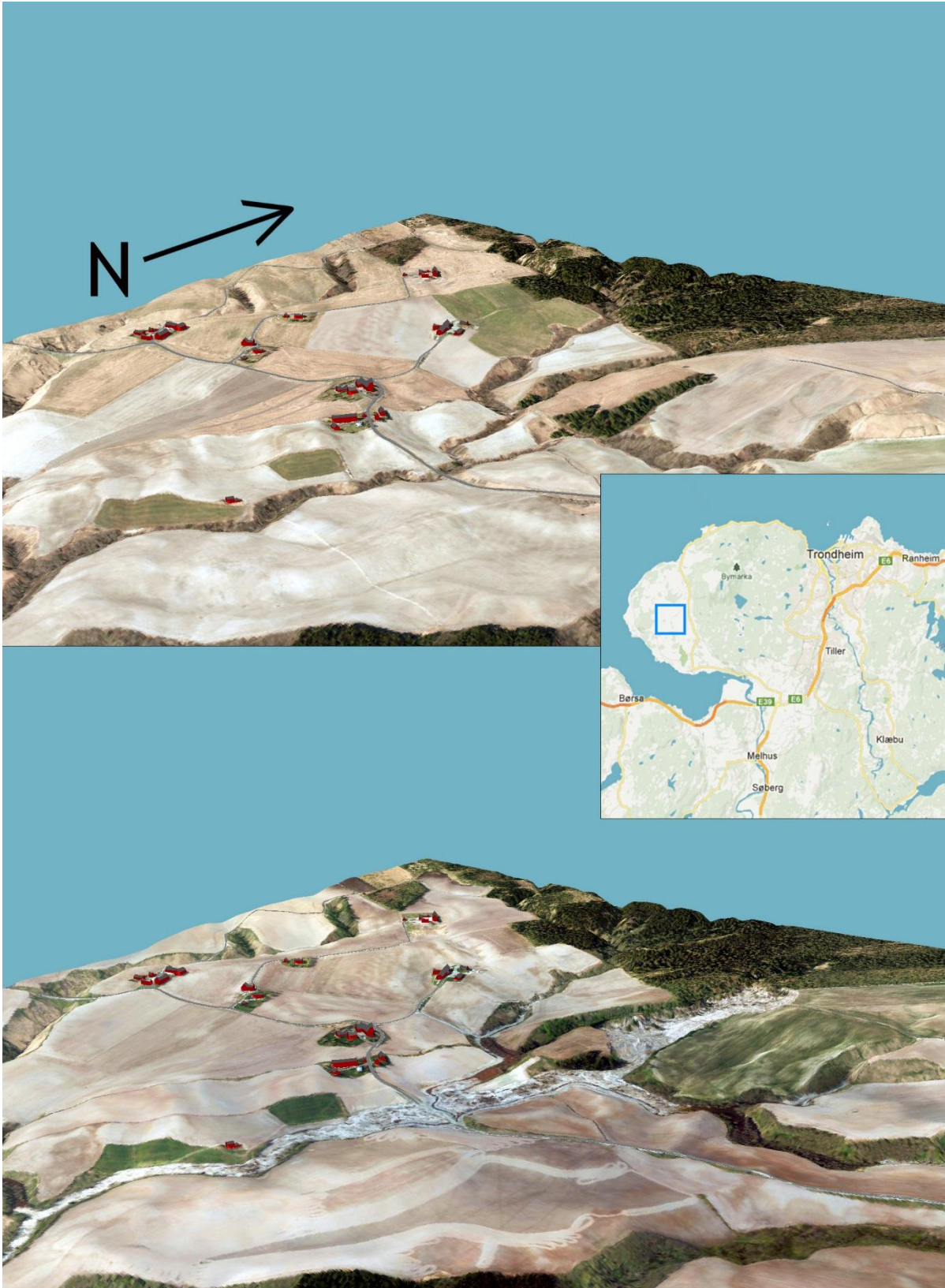
Selv om de fleste komponentene i denne oppgaven ikke er unike i seg selv er kanskje det som er spesielt nyskapende den høyoppløste terrengmodellen og bruk av grupperingsteknikker til å identifisere mulige kilder til skredutløsning. Slike terrengmodeller er foreløpig ikke nasjonalt dekkende og en eventuell lignende analyse i en annen kommune vil være betinget at det finnes en tilsvarende terrengmodell. Denne oppgaven vil imidlertid fungere som et eksempel på hva som er gjennomførbart med en slik ny nasjonal terrengmodell med høy oppløsning, som har vært etterspurt i lang tid, av både offentlige og private aktører (Lie 2013; Statens Kartverk 2014a).

1.2.2 Hendelsesforløp og årsak til skredet på Byneset

Kvikkleireskredet ved Esp på Byneset startet tidlig 1. januar 2012 i et område som NVE og NGI har kartlagt og klassifisert som faregrad 2, middels fare (NVE 2012). Dette betyr blant annet at det i området foregår aktiv erosjon og at det tidligere har vært noe skredaktivitet (Gregersen 2008). I den foreløpige rapporten for skredet, som er utarbeidet av NVE i samarbeid med Jernbaneverket og Statens Vegvesen m.fl. (NVE 2012), påpekes det at skredet var relativt stort, med et totalt volum på om lag 350.000 m³ og at det målte om lag 100 meter i bredde og 400 meter i lengde, samt hadde et utløp på 870 meter (NVE 2012). Til sammenligning var volumene på kvikkleireskredene på Rissa i 1978 og i Verdalen i 1893 på henholdsvis 6.000.000 m³ (Askheim 2012), og 55.000.000 m³ (Bjerrum 1955).

Årsaken til skredet antas å være en gradvis økende erosjon i et bekkedar tilknyttet nedbørsfeltet Ristbekken (NVE 2012). En økning i bekkens eroderende evne kan oppstå på bakgrunn av ekstremvær og spesielt økt nedbør (Sulebak 2007). NVE (2012) har imidlertid kommet frem til at dette alene ikke har vært den utløsende faktoren ettersom nedbørsmengdene i forkant av skredet ikke ligger nevneverdig utenfor normalen.

Det ble gjort en skanning av skredområdet kort tid etter hendelsen, ved hjelp av helikopter utstyrt med en LiDAR-skanner. Det var Blom ASA, som fikk oppdraget, noe som resulterte i en punktsky tilsvarende den som allerede finnes for hele Trondheim, bare avgrenset til skredområdet, og med noe høyere oppløsning (Geomatikkbransjen 2014). Disse to datasettene gjør det enkelt å visualisere området før og etter skredet. Figur 1.4 viser området før og etter skredet, visualisert i ArcScene ved hjelp av de to LiDAR-deriverte terrengmodellene, og flyfoto fra Norge i bilder. Data fra Statens Kartverks FKB har blitt brukt til å visualisere veier og hus i 3D. Flyfotoet er tatt noen måneder etter skredet og viser derfor ikke de helt ferske skredmassene.



Figur 1.4: Oversikt over skredområdet ved Esp på Byneset, før og etter skredet i 2012. Datakilder: Trondheim kommune, Statens Kartverk, Norge i bilder og Google Maps.

1.3 Tidligere arbeid

Det er mye litteratur knyttet til enkeltkomponentene i denne oppgaven; LiDAR og GIS (Longley et al. 2011; Aronoff 2005), statistisk analyse (Jain 2010), og geomorfologi og fluvialgeomorfologi (Sulebak 2007; Knighton 1998). Det er også mye litteratur som knytter sammen disse fagfeltene (f.eks. L'Heureux et al. 2014; Etzelmüller et al. 2007; Kondolf et al. 2003; Mitasova et al. 1996; Heritage og Hetherington 2007). Det er imidlertid vanskeligere å finne litteratur som er direkte relevant for oppgavens problemstilling. Ulempen med å ikke ha litteratur fra lignende tidligere arbeid er at en må støtte seg på teori fra enkeltkomponentene i oppgaven, noe som er mindre tilfredsstillende. Modellering av generell jorderosjon i GIS er for eksempel nødvendigvis ikke anvendbart for erosjon i kvikkleire ettersom forskjellige faktorer ligger til grunn for estimering av erosjon i ulike jordtyper (se kapittel 2.1.2). Dette er også et tegn på at det kanskje er på tide at en utforsker mulighetene for bruk av høyoppløste geografiske data, GIS og statistisk analyse til å kartlegge potensielle skredutløsere.

1.4 Oppgavens oppbygning

Oppgaven er delt inn i seks kapitler. Det første kapitlet beskriver forskningsspørsmål, en beskrivelse av studieområdet og hvorfor dette er et spesielt godt egnet område for en studie som dette, og tidligere utført arbeid. I kapittel to blir det presentert teori og begreper som er relevante for oppgaven. Det tredje kapitlet tar for seg datagrunnlaget og den metodiske arbeidsflyten. Siden det ikke ble utført noe feltarbeid vil dette kapitlet stort sett dreie seg om evalueringen av kildedata og den påfølgende bearbeidingsprosessen. I det fjerde kapitlet gjennomføres analysene, og resultatene blir presentert. En kort tolkning av resultatene gis også i dette kapitlet. I kapittel fem blir den metodiske fremgangsmåten, analyseprosessen og resultatene diskutert, mens en konklusjoner og avsluttende kommentarer gis i det sjette og siste kapitlet.

2 Teori og metode

Det er en rekke ord og uttrykk som går igjen i denne oppgaven, noen av disse er selvforklarende mens andre behøver en nærmere beskrivelse. Jeg vil i dette kapitlet beskrive teori og begreper som har størst relevans for oppgaven.

2.1 Naturgeografisk teori

I denne oppgaven blir begrepene elver og bekker brukt hyppig. Jeg har valgt å definere en elv eller bekk representert i GIS, som en enkelt linje mellom et start- og sluttpunkt, eller mellom et startpunkt og der hvor tre eller flere linjesegmenter møtes. Videre følger teori om kvikkleire og erosjon.

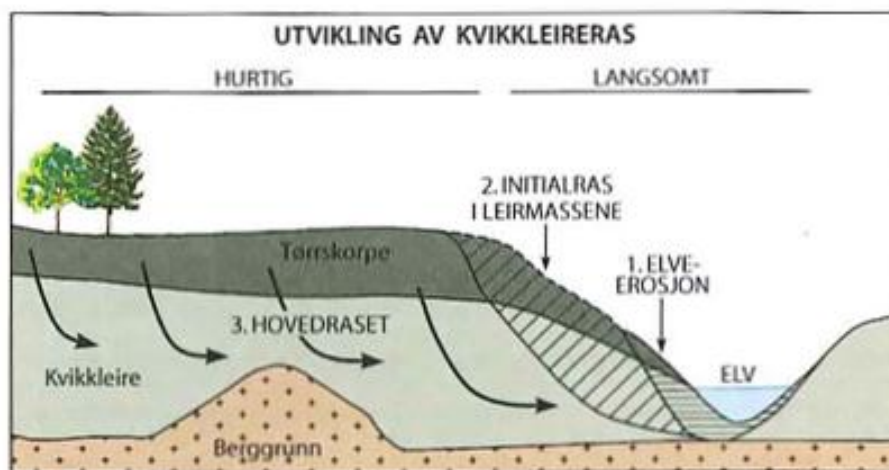
2.1.1 Kvikkleire

Som en kan se på kartet som viser distribusjonen av marine avsetninger og kvikkleiresoner i Trondheim (figur 1.3) er det ganske store arealer som består av marine avsetninger. Det er imidlertid ikke slik at alle disse områdene er klassifisert som kvikkleiresoner. Det er fordi marine avsetninger ikke er ensbetydende med kvikkleire, og vanlig leire trenger heller ikke være «kvikk» (Fergus et al. 2010). Det som i hovedsak kjennetegner områder med kvikkleire er at det salte porevannet som befinner seg i de marine avsetningene har blitt vasket bort over tid, av f.eks. ferskvann fra nedbør og grunnvann, slik at leiren blir mindre stabil og mer utsatt for utglidninger og skred (Vorren et al. 2007). Kvikkleire sammenlignes ofte med et ustabil korthus (figur 2.1). Dette er fordi de marine partiklene som leiren er bygget opp av ser ut som små flak, og er bundet sammen av ionene i saltvannet (1). Når disse ionene over tid vaskes bort i enkelte områder, vil flakene stå igjen som et korthus klart til å velte ved den minste overbelastning (2) (Reitan 2012; Spjeldnæs 2012). Når dette korthuset kollapser, for eksempel på grunn av erosjon, blir leiren tilnærmet flytende, og renner ut (3). Når massene får satt seg etter raset vil leiren være adskillig mer stabil og tettpakket en før (4) (Reitan 2011).



Figur 2.1: Kvikkleire, før, under og etter skred. Kilde: Reitan 2011.

På grunn av kvikkleirens korthusstruktur, er det ofte slik at raset starter med et initialras, et mindre ras som raskt forplanter seg bakover og ut til sidene i leirmassene, helt til det støter på masser som er stabile nok til å motstå videre utglidninger, eller til utløpsveien blir fylt opp av skredmassene (Vorren et al. 2007; Bjerrum 1955; Holmsen 1953) (se figur 2.2). En kan sammenligne dette med at en velter eller fjerner et av kortene i korthuset. Resten av korthuset mister da den stabiliserende effekten og kollapse. Dette er ofte tilfelle ved erosjon i nærliggende elve- og bekkefar, og kan tydelig observeres når en sammenligner bilder før og etter skredet på Byneset (figur 1.4). Elven eller bekken eroderer horisontalt eller vertikalt, noe som er naturlig. Når den etter hvert begynner å erodere inn i leirmassene kan dette sammenlignes med å fjerne et av de stabiliserende kortene i korthuset som i dette tilfellet er en analogi for den totale kvikkleiremassen.



Figur 2.2: En visuell presentasjon av hvordan et kvikkleireskred kan utvikle seg fra erosjon, via initialras til et stort skred. Kilde: Vorren et al. 2007.

Det er ikke bare selve kvikkleireskredet som utgjør en trussel for mennesker og materielle verdier, men de mange potensielle bivirkningene av et slikt skred. Eksempler på dette kan være oppdemming av elver som kan føre til små og store flodbølger som for eksempel i Gauldalen skredet i 1345, eller langvarig utilgjengelighet av områder på grunn av leirens våthet, som kan ta flere uker før tørker og stivner (Furseth 2006; Holmsen 1953).

2.1.2 Erosjon

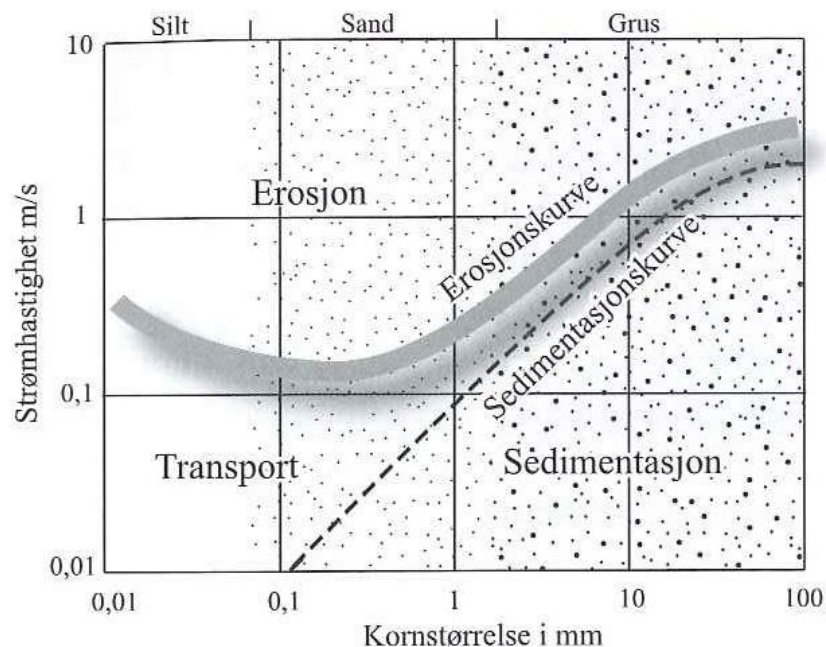
En av hovedårsakene til naturlig utløsning av kvikkleireskred er erosjon i elve- og bekkefar (Holmsen 1953). Dette er også en av de faktorene som er vektet høyest i NVE og NGI sin klassifisering av kvikkleiresoner (se tabell 3.1 i kapittel 3.3.3) (Gregersen 2008). Siden jeg i denne oppgaven fokuserer på elver og bekker er erosjon et viktig tema.

Erosjon i løsmateriale er prosessen som oppstår når løsmassene ikke lenger klarer å motstå kreftene i vannet, slik at de blir satt i bevegelse (Sulebak 2007). Denne prosessen finner vi i så å si alle vassdrag og kan sies å være motsetningen til sedimentasjon, som oppstår når vannet ikke lenger har nok styrke til å frakte materiale, slik at det blir avsatt (Sulebak 2007; Knighton 1998). Erosjon er relatert til vannets hastighet og arbeidspotensiale, og det er i hovedsak to faktorer som påvirker disse (Sulebak 2007). Den første er økt vannføring, som gir en økning i vannets hastighet og mengde. Dette gjør at vannet får større kraft til å flytte partikler fra et sted til et annet (Fergus et al. 2010). Den andre faktoren er en økning i skråningsgradienten. Skråningsgradienten til et vassdrag, eller deler av det, finner vi ved å dele elvens lengde (eller lengden mellom to punkter) på høydeforskjellen fra elvens start- og slutt punkt (eller høydeforskjellen mellom disse to punktene). Skråningsgradienten har svært mye å si for elven eller bekkens hastighet og arbeidspotensiale og vil i følge Sulebak (2007) ha en større erosjonsvirkning enn økt vannføring. En økning i vannføringen vil imidlertid føre til mer erosjon i elvebunnen, ved tilstrekkelig vannhastighet (Sulebak 2007; Fergus et al. 2010).

De mest vanlige årsakene til økt erosjon er for eksempel flom utover det som er vanlig i området over en 1-2 års periode, eller en endring i tilførselen av sedimenter på bakgrunn av menneskelige inngrep (Fergus et al. 2010). Andre faktorer kan være landheving som øker skråningsgradienten til elven eller bekken, kraftig nedbør, avskoging og urbanisering (Sulebak 2007).

Det finnes en del måter å beskrive ulike jordarters erosjonsmotstand. En av de mest kjente er Hjulströms kurve (figur 2.3). Denne viser hvordan vannhastighet og kornstørrelsen til ulike

jordarter henger sammen i forhold til erosjon, transport og sedimentasjon (Sulebak 2007). Ut fra denne figuren skulle man tro at leire, på grunn av liten kornstørrelse er lett eroderbar. Erosjonsmotstanden i ulike jordarter er imidlertid ikke bare en funksjon av partikkelstørrelsen (Knighton 1998). Når det gjelder erosjon i leire spiller enkeltkornenes størrelse og vekt en mindre rolle. Dette er fordi leiren i større grad har en kohesiv effekt enn andre jordarter. Kohesjon beskriver de bindende kreftene mellom enkeltkorn i jordarter og kan variere fra svært sterk til svak motstand mot erosjon (Fergus et al. 2010). Således er erosjon i leire mer avhengig av styrken på den kohesive effekten mellom partiklene, og hvis den kohesive effekten er svært sterk vil leiren være mer motstandsdyktig mot erosjon, enn om den er svak (Knighton 1998; Sulebak 2007).



Figur 2.3: Hjulstrøms kurve. Kilde: Sulebak 2007.

Det finnes mange ulike sikringstiltak mot erosjon i vassdrag. Det kan for eksempel være å forsterke elvesidene, eller å tilføre elvebunnen materiale med større kornstørrelse som vannet ikke klarer å transportere. En utfordring med dette er at erosjonssikring et sted vil påvirke vannets dynamikk andre steder i vassdraget. En typisk effekt av erosjonssikring i vassdragets sider, er at vannet begynner å erodere mer i bunnen slik at elvebunnen senkes, enten lokalt eller over lange strekk (Fergus et al. 2010).

2.2 Geografiske Informasjonssystem (GIS)

Det finnes mange definisjoner på hva et GIS er, men grovt forklart kan det sies å være vitenskap, teknologi og metodologi som omfatter beskriving, forklaring, analyse og prediksjoner om stedfestet data (Longley et al. 2011; Heywood et al. 2006). I denne oppgaven brukes GIS til å bearbeide og analysere geografiske data fra flere leverandører, for å prøve å gi en prediksjon på hvilke elver og bekker som kan være potensielle skredutløsere. Det finnes programvare for denne typen oppgaver fra mange leverandører og i denne oppgaven er det ESRI sitt ArcGIS med ArcInfo lisens som er benyttet.

2.2.1 Grunnleggende prinsipper

I GIS skiller vi i stor grad mellom raster- og vektordata. Dette er i bunn og grunn to ulike formater for å representere verden, med ulike fordeler og ulemper. Kort fortalt er et raster en samling av like store celler som henger sammen i et rutenett. Disse cellene er som oftest rektangelformede, men kan i utgangspunktet ha hvilken som helst form. Hver celle kan representere uendelig mange attributter¹, men kun én verdi av samme attributt om gangen. For eksempel kan én enkelt celle i et raster kun representere én høydeverdi eller én jordtype, på samme tid. Vektordata på sin side består i sin mest grunnleggende form av punkter, linjer og flater (også kalt polygoner). Mens raster sies å være best på å representere *kontinuerlige* variabler som f.eks. høyder, nedbørsmengder og andre variabler uten klart definerte grenser, er vektor som regel bedre på å representere *diskrete* og *kategoriske* objekter som veier, elver, hus, og lignende ting som i større grad har klart definerte grenser eller former (Longley et al. 2011; Heywood et al. 2006).

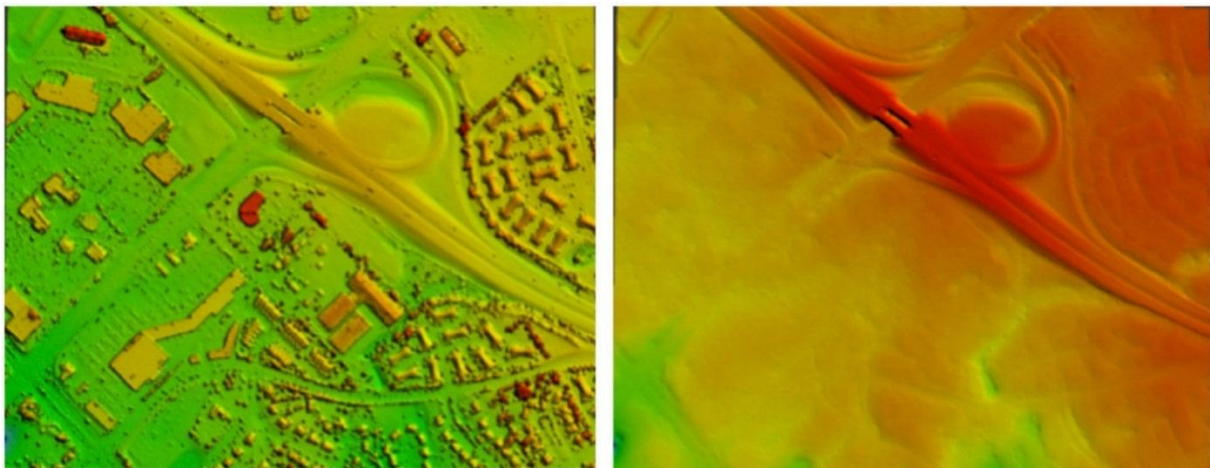
2.2.2 Terrengmodell

Dette begrepet er i utgangspunktet en variasjon av det vi kjenner som en høydemodell eller DEM (Digital Elevation Model) (Agarwal et al. 2013). En høydemodell kjennetegnes ved at den er basert på punktdata med geografisk plassering i tre dimensjoner: lengde, bredde, og høyde (X, Y, Z). Detaljnivået til høydemodellen er betinget den fysiske avstanden mellom hvert målepunkt (Aronoff og Petrie 2005). Begrepet kan så deles inn i flere varianter, som f.eks. terrengmodeller og overflatemodeller (figur 2.4) (Agarwal et al. 2013). En terrengmodell

¹ En attributt er en variabel som beskriver informasjon om et objekt. F.eks. lengde eller navn på en elv (Wade og Sommer 2006).

er en representasjon av den nakne jordoverflaten uten elementer som vegetasjon, bygninger og infrastruktur, i motsetning til en overflatemodell som kan inneholde alle disse elementene og som regel er derivert fra det første returnerende signalet ved bruk av en aktiv fjernanalytisk metode som f.eks. LiDAR (se delkapittel 2.3 for mer info om LiDAR) (Aronoff og Petrie 2005).

En terrengmodell kan gjengis i både raster- og vektorformat. En rasterbasert terrengmodell er bygd opp av celler i et såkalt grid, med unike høydeverdier for hver celle, mens en vektorbasert terrengmodell, som oftest kjent som et Triangulated Irregular Network (TIN), består av triangler i ulike størrelser og fasonger, som ikke overlapper hverandre (Liu 2008; Ali 2004). En annen variant som også er mye brukt er høydekoter. Dette er vektorbaserte linjer som representerer en gitt høydeverdi langs hele linjen (Liu 2008), og er ofte brukt i tradisjonelle topografiske kart. For analyseformål er som regel et rasterbasert grid av celler det beste grunnlaget, mens en vektorbasert modell ofte fungerer best for visualisering (Ali 2004). I denne oppgaven brukes det av den grunn en rasterbasert terrengmodell.



Figur 2.4: Forskjellen mellom en overflatemodell (venstre) og en terrengmodell (høyre). Kilde: Agarwal et al. 2013.

2.2.3 Oppløsning

Oppløsning er et begrep som blir brukt i mange sammenhenger, og som blant annet brukes for å beskrive detaljnivået i rasterdata. Laurini og Thompson (1992, som sitert i Heywood et al. 2006) beskriver oppløsning som “...the size of the smallest recording unit” (s. 62). I raster-sammenheng beskrives oppløsning ofte med fysiske mål som meter og centimeter. For eksempel et raster med en oppløsning på 10x10 meter betyr at hver celle i rasteret representerer 10 meter i X og Y retning, i den virkelige verden, og at objekter under denne størrelsen

vanskelig lar seg beskrive. Dette kalles som regel for *romlig oppløsning* (Longley et al. 2011; Heywood et al. 2006).

Kart oppgis som oftest med en skala, og oppløsning kan således sies å være beslektet dette. Burt (2009) beskriver I den sammenheng oppløsning som “...*the spatial scale at which we observe individual items of interest and, by inference, the scale below which we do not seek to focus our studies*” (s. 200). Dette kan forstås som at oppløsningen til et datasett betinger hvilken skala analysene kan utføres på og hvilken skala vi kan representere resultatene med, og det er slik begrepet er brukt i denne oppgaven; desto høyere oppløsning, jo mer detaljerte kart kan vi lage, og desto mer nøyaktige analyser kan vi utføre.

Når vi ser oppløsning i sammenheng med en høydemodell er det en del faktorer som avgjør hvor god oppløsning høydemodellen kan ha. Spesielt viktig er nøyaktigheten og tettheten på målingene i kildematerialet. Liu et al. (2007) påpeker at jo høyere tetthet du har på målingene desto mer riktig vil den resulterende høydemodellen bli. Oppløsningen på terrengmodellen bør minimum tilsvare punkttettheten til datasettet (Liu 2008). I tillegg spiller også valg av interpoleringsmetode en viktig rolle (Liu et al. 2007), et begrep som forklares nærmere i neste delkapittel.

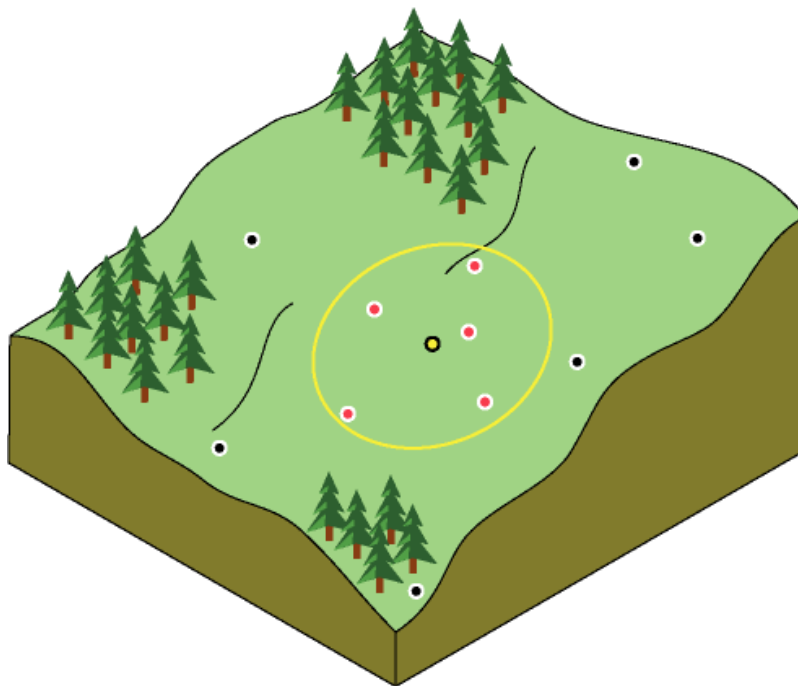
2.2.4 Interpolering og generalisering

Interpolering er kort fortalt prosessen med å estimere verdier til et punkt hvor en ikke har målinger, basert på punkter som allerede er målt. I en terrengmodelleringsprosess innebærer dette å estimere høydeverdier de stedene en ikke har målinger, basert på nærliggende målinger (Liu 2008) (se figur 2.5).

Ettersom jeg i denne oppgaven bruker en vektorbasert punktsky til å generere en rasterbasert terrengmodell kommer jeg ikke utenom interpolering, fordi punktene i punktskyen ikke er jevnt fordelte over hele jordoverflaten, men har varierende avstand mellom hvert punkt (Lloyd og Atkinson 2006). Det kan derfor hende at enkelte områder ikke har målepunkter i det hele tatt, som derfor må interpoleres basert på omkringliggende målinger. Hvilken interpoleringsmetode en benytter seg av kan ha stor betydning for den resulterende høydemodellen (Liu 2008), og det er gjort mange forsøk på å fastslå hvilken algoritme som gir det beste resultatet for ulike formål (se f.eks. Lloyd og Atkinson 2006; Su og Bork 2006; Ali 2004; Lloyd og Atkinson 2002).

Det finnes mange ulike interpoleringsalgoritmer for å estimere verdier, men de kanskje mest brukte i GIS-verdenen er Inverse-Distance Weighting (IDW) og Kriging (Longley et al. 2011). IDW bruker en algoritme som estimerer verdier basert på et vektet gjennomsnitt av kjente nærliggende verdier hvor de nærmeste tildeles en høyere vektning enn de som ligger lenger fra punktet som skal interpoleres (Ali 2004) (figur 2.5). Det er i bunn og grunn Toblers lov om at nære ting er mer beslektet enn fjerne ting, som ligger til grunn for denne interpoleringsalgoritmen (Longley et al. 2011; Mæhlum 2013).

Den interpolerte verdiens nøyaktighet vil med IDW være avhengig av antallet kjente målinger, og hvor nærme disse ligger det ukjente punktet (Longley et al. 2011). En av ulempene med IDW er at den interpolerte verdien aldri kan være større eller mindre enn de kjente verdiene, noe som gjør at denne metoden ikke egner seg så godt til terrengmodellering hvis avstanden mellom de kjente og ukjente punktene er mye større enn den romlige oppløsningen på terrengmodellen en ønsker å lage (Liu 2008), jfr. oppløsning og punkttetthet forklart i kapittel 2.2.3 (Liu et al. 2007).



Figur 2.5: En visuell fremstilling av hvordan IDW fungerer. Det gule punktet har en ukjent verdi som vi vil finne ut av. De røde punktene er kjente verdier som IDW bruker for å beregne verdi fra, innenfor søkeområdet som er den gule sirkelen. Kilde: ESRI 2013a

Formelen for IDW er vist på neste side hvor $Z(x)$ er den ukjente verdien, og Z_i er den kjente. W_i representerer vektningen til punktet Z_i (Lonley et al. 2011):

$$Z(x) = \frac{\sum_i W_i Z_i}{\sum_i W_i}$$

Vektingen kan kalkuleres på forskjellige måter men den vanligste er vist under hvor W_i er vektingen til det kjente punktet, og d_i er avstanden mellom det kjente punktet og det ukjente punktet som skal interpoleres (Longley et al. 2011):

$$W_i = \frac{1}{d_i^2}$$

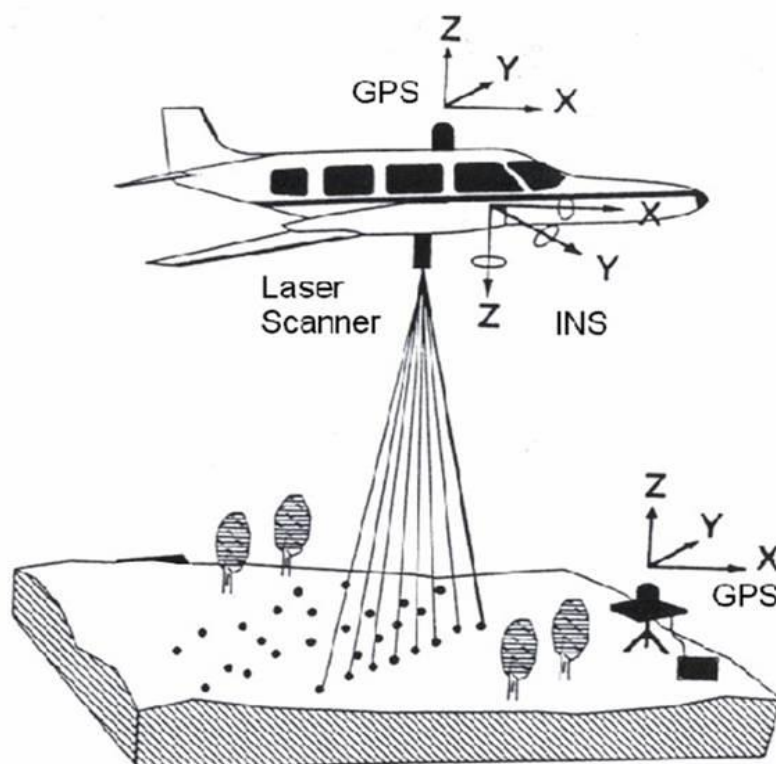
Kriging krever i motsetning til IDW mer av brukeren ettersom det finnes mange ulike varianter av kriging algoritmen (Longley et al. 2011). Til gjengjeld kan denne metoden gi bedre resultater enn IDW når avstanden mellom de kjente målepunktene er stor (Lloyd og Atkinson 2002). Mens IDW kun tar høyde for avstanden mellom det ukjente og de kjente målepunktene, tar Kriging også høyde for variasjon blant de kjente målingene ved hjelp av et såkalt variogram (Liu 2008).

Det er ingen interpoleringsmetode som er universelt best til alle formål. Kriging er i noen tilfeller bedre enn IDW, men om punkttettheten er høy påpeker Ali (2004) og Lloyd og Atkinson (2006) at det er liten forskjell mellom de to metodene. Dette gjør IDW til en god interpoleringsmetode for terrengmodellering basert på data fra LiDAR, ettersom LiDAR-data somregel har svært lav punktavstand (Liu 2008).

Generalisering på sin side omfatter blant annet å forenkle og sammenslå elementer, og alle romlige data forenkles til en viss grad under digitaliseringsprosessen (Longley et al. 2011; Heywood et al. 2006). For eksempel trenger man kanskje ikke like mange linjesegmenter for å representere en elv på et storskala kart i forhold til et kartutsnitt med en mye mindre skala (Longley et al. 2011). Et annet eksempel kan være hvis vi ønsker å redusere oppløsningen til et raster. Vi kan da bruke middelverdien til for eksempel fire celler, som verdi for én celle som er sammensatt av de fire cellene. Om cellene i utgangspunktet hadde 1 meter oppløsning har vi da redusert den romlige oppløsningen til rasteret fra 1 til 4 meter (Wade og Sommer 2006).

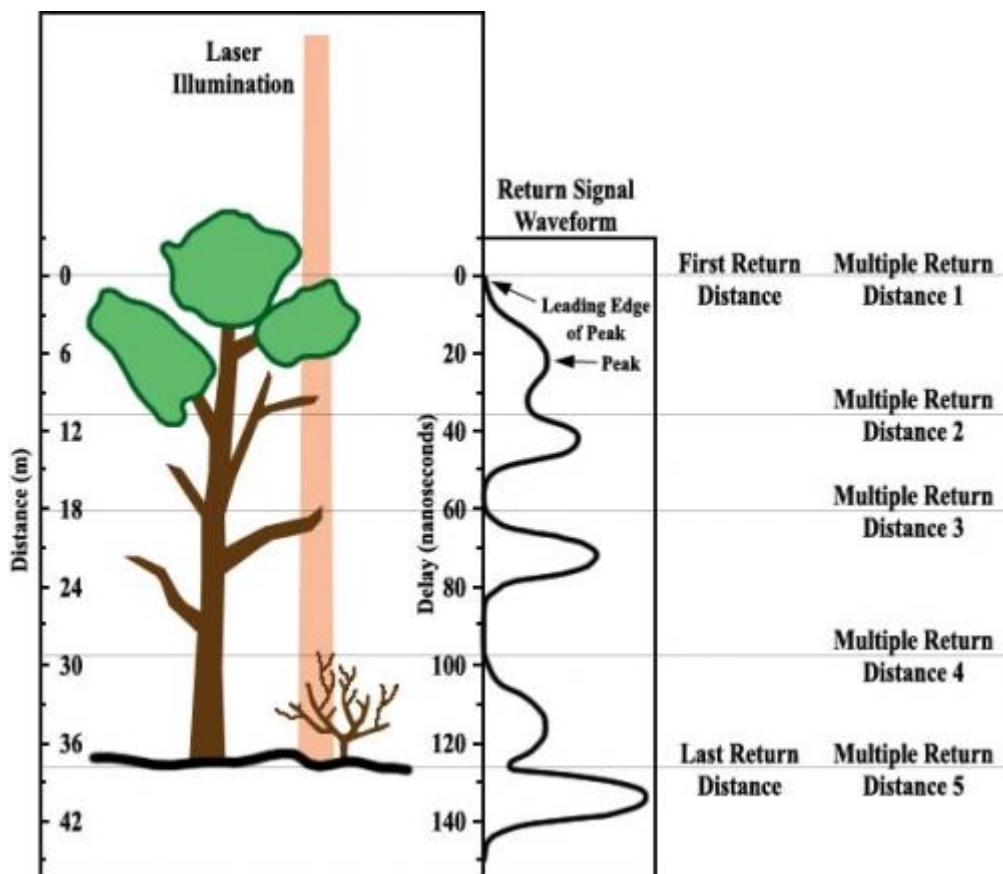
2.3 LiDAR

Datasettet som er utgangspunktet for terrenngmodellen i denne oppgaven er innsamlet ved hjelp av en såkalt LiDAR. LiDAR står for “Light Detection and Ranging” og er en aktiv fjernanalytisk metode (Liu 2008). Det er i hovedsak tre teknologier som sammen registrerer data. Hovedteknologien er en type skanner som bruker laserstråler til å måle avstanden til terrenget eller objekter på bakken, fra f.eks. et fly. I tillegg brukes en GPS (Global Positioning System) og en IMU (Inertial Measuring Unit) for å korrigere for flyets bevegelser i alle retninger (Aronoff og Petrie 2005). Avstanden måles ved å tolke tiden det tar fra laserstrålen sendes ut, til den returnerer til instrumentet, ved hjelp av en ekstremt presis klokke, og data fra GPS og IMU (Ali 2004; Lloyd og Atkinson 2006). I tillegg brukes også en GPS plassert på bakken til å gjøre korreksjoner på målingene i ettertid (Aronoff og Petrie 2005). Figur 2.6 viser en forenklet modell av hvordan teknologien fungerer i praksis.



Figur 2.6: En forenklet illustrasjon av hvilke komponenter som utgjør et fly-basert LiDAR-system. INS er det samme som IMU. Kilde: Kao et al. udatert.

Posisjonen til hvert punkt bestemmes i tre dimensjoner og ofte med en nøyaktighet på noen få centimeter (Ali 2004; Aronoff og Petrie 2005). En av fordelene til et LiDAR-system, i tillegg til å måle flere tusen punkter per sekund (Longley et al. 2011), er muligheten til å fange opp og lagre flere retursignaler fra samme laserstråle. F.eks. kan det første retursignalet være fra en treetopp mens det neste kan være en gren på samme tre, og det siste kan være den faste jordoverflaten (Aronoff og Petrie 2005) (se figur 2.7).



Figur 2.7: En visuell fremstilling av retursignalene fra en laserstråle. Kilde: e-Education/ASPRS udatert.

Ved hjelp av avanserte filtreringsteknikker kan disse signalene tolkes og filtreres slik at man sitter igjen med et datasett med punktdata om akkurat det en trenger, kalt en punktsky (Longley et al. 2011; Aronoff og Petrie 2005). Hvis målet er å lage en terrengmodell av den nakne jordoverflaten vil man som regel filtrere vekk alt som ikke har et retursignal som tilsier at det er jordoverflaten (Aronoff og Petrie 2005). De fleste filtreringsteknikkene tar utgangspunkt i høyde og skråningsforskjeller mellom punktene. Hvis høydeforskjellen mellom to punkter overstiger en brukergitt terskel vil f.eks. det høyeste punktet filtreres bort til en annen klasse

(Liu 2008). For eksempel er det ikke alltid at det siste retursignalet er fast grunn (ESRI 2013b). Det kan f.eks. være et hustak, en bil eller lignende, noe som gjør filtreringsprosessen svært viktig for å kunne lage en nøyaktig modell, og nye filtreringsmetoder foreslås og testes ut hele tiden (Liu 2008). Denne filtreringsprosessen gjøres som regel av de som gjennomfører datainnsamlingen, og data leveres i dag typisk som LAS filer som inneholder informasjon om nettopp denne filtreringen i form av en punktsky klassifisert etter gitte standarder for f.eks. vegetasjon, jordoverflate og støy (ESRI 2013c; ESRI 2013d), i tillegg til andre metadata om innsamlingsprosessen, som f.eks. innsamlingsområde, punktavstand, dato for innsamling etc. (ESRI 2013e).

Selv om LiDAR generelt har høy nøyaktighet og er spesielt godt egnet til å lage overflate- og terrengmodeller, har teknologien også svakheter. Su og Bork (2006) påpeker at skråningsgradienten til overflaten spiller en rolle i den vertikale nøyaktigheten til målingene. For terrengmodellering har dette mye å si ettersom det i hovedsak er høydeverdiene til målingene som er interessante. Andre elementer som kan påvirke nøyaktigheten er tett vegetasjon som er vanskelig for laserstrålene å trenge gjennom, og vann (Heritage og Hetherington 2007).

2.4 Analytiske teknikker

Det finnes en rekke metoder for å analysere datasett likt det jeg bruker i denne oppgaven, og ulike former for statistisk analyse for klassifisering av geomorfologiske og fluvialgeomorfologiske karakteristikk er heller ikke noe nytt (Etzelmüller et al. 2007; Kondolf et al. 2003). Siden oppgavens formål er å identifisere elver og bekker basert på sammenlignbare variabler, kan en metode være å bruke en form for klyngeanalyse. Dette kan grovt forklares som en måte å analysere data på for å identifisere naturlige klynger av elver og bekker eller andre objekter som har kvantifiserbare likheter. Jain (2010) definerer gruppering med klyngeanalyser som følger: *“Given a representation of n objects, find K groups based on a measure of similarity such that the similarities between objects in the same groups are high while the similarities between objects in different groups are low.”* (s. 652).

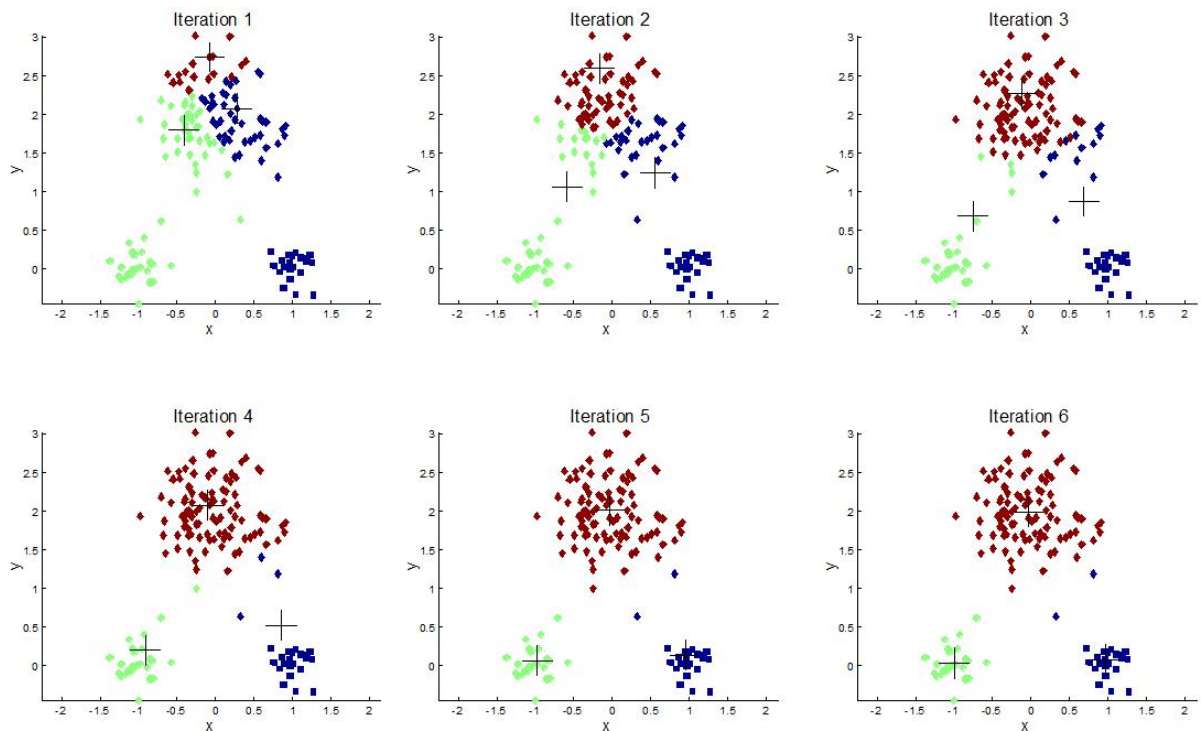
Det finnes mange forskjellige klyngealgoritmer for bruk til ulike formål, men den mest brukte er uten tvil K-Means algoritmen (Jain 2010). Denne algoritmen forklares i delkapittel 2.4.1.

Det trenger imidlertid ikke være noen klart avgrensede klynger for å gruppere data, ettersom algoritmene uansett vil splitte opp datasettet og plassere det i det oppgitte antallet klynger (Jain 2010). Dette påvirker imidlertid de resulterende gruppene eller klyngenes validitet (Jain 2010; Jain og Dubes 1988). Jain og Dubes (1988) mener grupper er valide “... *if it is unusual in some sense*” (s. 143), noe som kan være vanskelig å definere. Enkeltgruppers validitet kan imidlertid evalueres etter hvor kompakte og adskilte de er i forhold til andre grupper. Problemet er i hovedsak å definere hva som er «uvanlig» (Jain og Dubes 1988).

2.4.1 Analyse i ArcGIS

I 2012 introduserte ESRI versjon 10.1 av ArcGIS, som blant annet inneholdt et nytt verktøy for romlig statistisk analyse, kalt Grouping Analysis (ESRI 2014a; ESRI 2014b). Dette verktøyet gjør det mulig å analysere og klassifisere punkt-, linje- og flatedata, basert på en eller flere variabler i et datasett. Denne analysemetoden er en form for klyngeanalyse, og kan undersøke om det finnes naturlige klynger av objekter, og om disse er plassert i samme geografiske område (ESRI 2014b). Til mitt formål er den romlige biten i denne analysemetoden ikke spesielt relevant, da elver og bekker kan ha lignende karakteristikk selv om de ikke befinner seg i samme geografiske område. Når en slik romlig analysealgoritme ikke brukes, analyseres data med en tradisjonell K-Means algoritme. Denne algoritmen fungerer ved at et utvalg «frø²» som tilsvarer antallet grupper en ønsker å klassifisere dataene i, velges ut enten tilfeldig eller brukerspesifisert. De resterende objektene blir så plassert i gruppen til det nærmeste frøet (i dataverdene, ikke geografisk plassering), hvorpå et gruppe-gjennomsnitt kalkuleres og et nytt objekt blir satt som frø, og gruppesammensetningene justeres på nytt ved at alle objektene plasseres i gruppen til det nyeste frøet som er nærmest, og slik fortsetter det gjennom flere gjentakelser helt til gruppesammensetningene stabiliseres (ESRI 2014b; Jain 2010) (se figur 2.8).

² Frø i denne sammenheng forstås som de objektene som algoritmen bruker som startpunkt for å «gro» grupper (ESRI 2014a). Altså de objektene som fungerer som referanse for alle de andre objektene når algoritmen skal plassere dem i grupper med lignende variabelverdier.

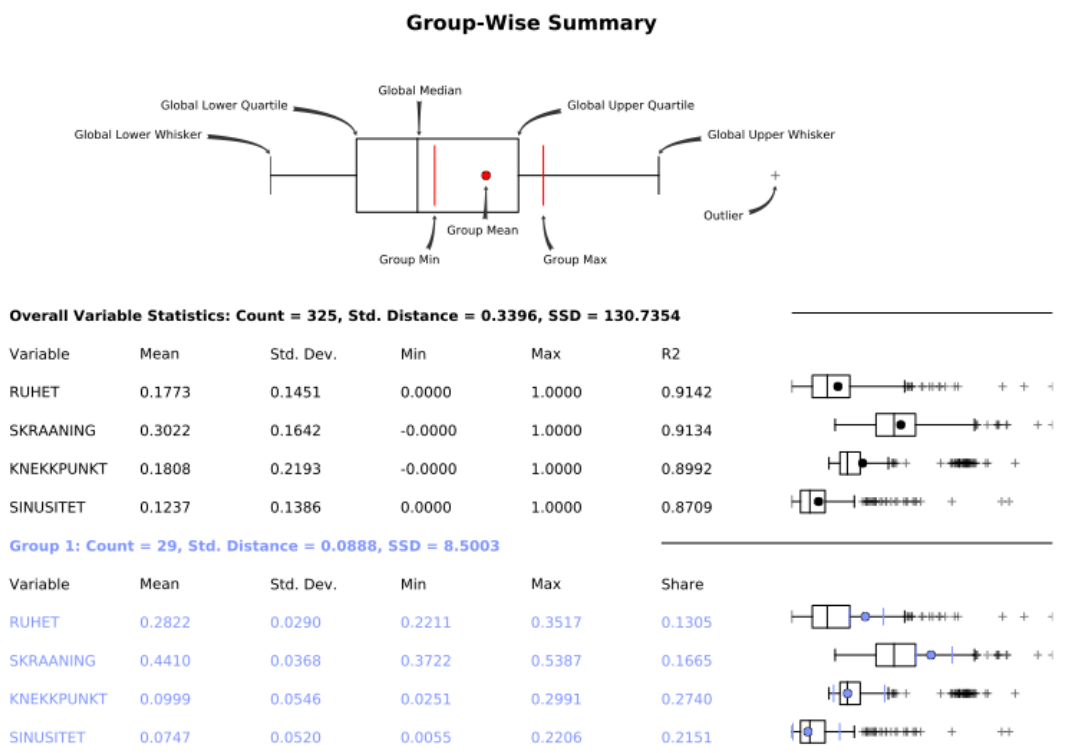


Figur 2.8: En visuell fremstilling av hvordan K-Means algoritmen gjennom flere gjentakelser kommer frem til de endelige klyngene. Kryssene indikerer det aktuelle objektet som fungerer som frø. Kilde: Pandre 2011.

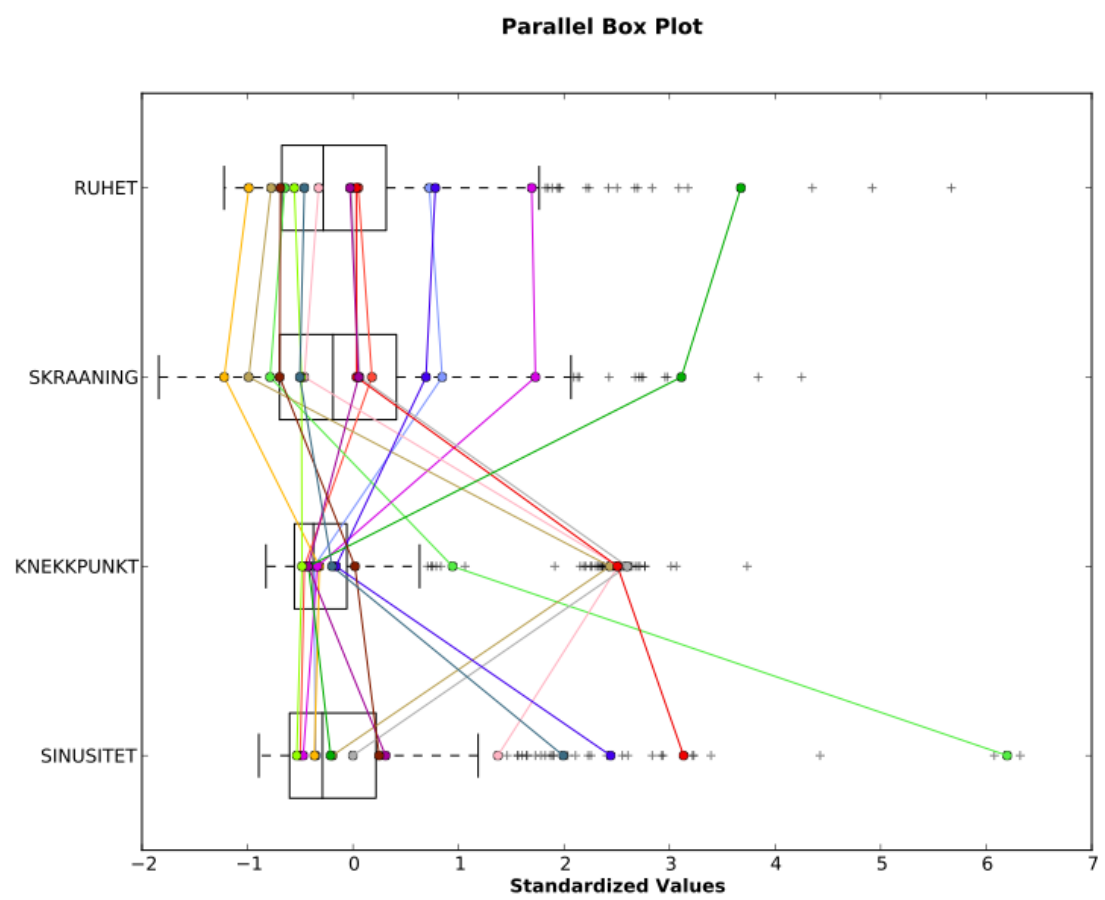
Det er forskjellige måter å velge ut disse frøene på. Dette kalles initialmetode (ESRI 2014a). Man kan velge ut alle frøene selv, eller bare noen. Hvis man velger ut bare ett objekt i datasettet som skal fungere som frø så vil alle de andre frøene velges tilfeldig. Man kan også la verktøyet plukke ut alle frøene tilfeldig. Verktøyet søker imidlertid hele tiden etter å plukke ut frø som ligger lengst mulig unna de andre frøene (se figur 2.8) (ESRI 2014a; ESRI 2014b).

Dette verktøyet krever en del prøving og feiling med antall variabler og grupper som brukes, for å finne ut hva som passer det datasettet som skal analyseres, om en på forhånd ikke har en klar formening om f.eks. hvor mange grupper datasettet skal grupperes i (ESRI 2014a; ESRI 2014b). Det som imidlertid er en av de store fordelene med dette verktøyet er at en har mulighet til å få generert en svært detaljert rapport med både numerisk og visuell oversikt over de forskjellige gruppesammensetningene, og hvilke kriterium som ligger til grunn for disse. Denne rapporten sammen med det resulterende klassifiserte datasettet i ArcGIS vil, om verktøyet brukes med omhu, gi brukeren en god oversikt over datasettets struktur og sammensetning. Figur 2.9 viser hvordan deler av denne rapporten ser ut.

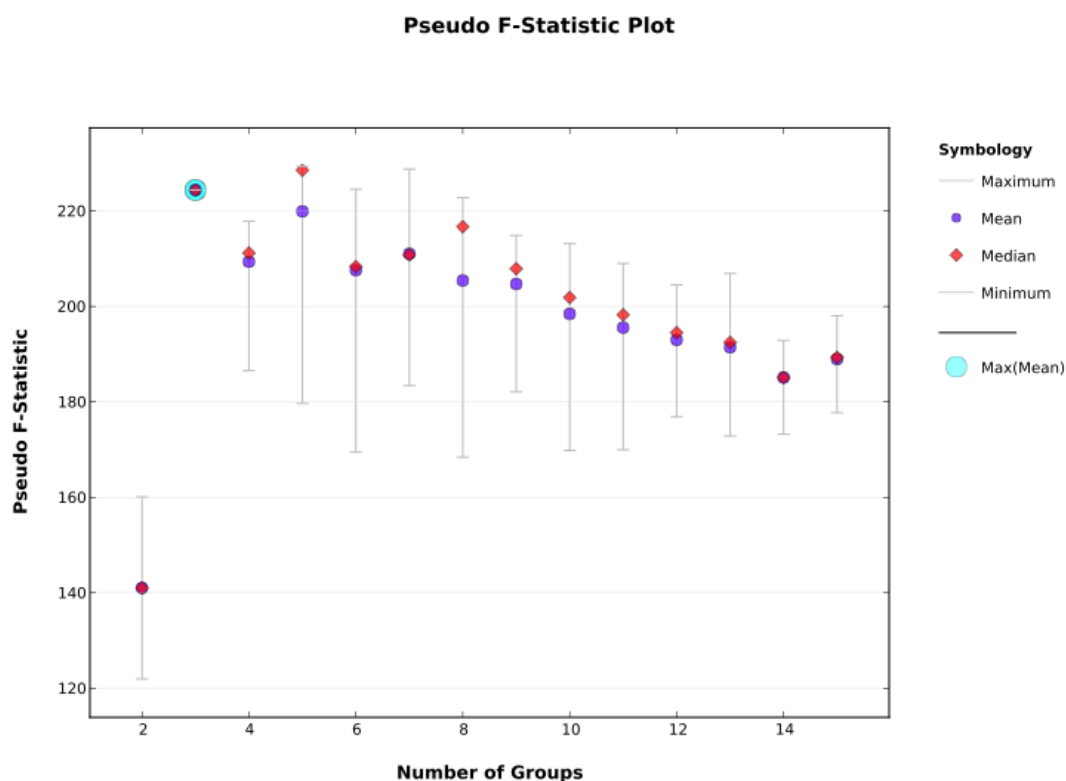
(a)



(b)



(c)



Figur 2.9: Tre av de viktigste elementene i rapporten til resultatene ved bruk av Grouping Analysis verktøyet i ArcGIS. Gruppevis oppsummering (a). Parallell boksplot graf som oppsummerer gruppene visuelt (b). Kalkulert pseudo F-indeks for 2 til 15 grupper (c). Se ESRI 2014b for mer utfyllende figurer og beskrivelse.

Først gis en visuell guide i hvordan å tolke resultatene og oppsummerende statistikk for hele datasettet, og en påfølgende gruppevis statistisk oppsummering (a). Videre gis en visuell fremstilling av variablene og gruppesammensetningene (b). Her representerer hver linje og farge én gruppe i resultatet. De horisontale linjene representerer hver variabel sin skala, hvor boksen indikerer gjennomsnittsverdien for den aktuelle variabelen (ESRI 2014b). Til slutt vises en graf over den kalkulerte pseudo F-indeksen (c).

Pseudo F-indeksen er et mål på forholdet mellom likheten på de brukte variablene innad i gruppene, og ulikheten mellom gruppene. Altså intern likhet i gruppene, og ekstern ulikhet mellom gruppene. Det antallet grupper som skårer høyest på denne indeksen (størst intern likhet og ekstern ulikhet) vil i teorien være det beste gruppealternativet for å gruppere det gitte datasettet (ESRI 2014b; Caliński og Harabasz 1972).

Det er også verdt å nevne «Share» og « R^2 » verdiene som oppgis (se figur 2.9a). Share er et mål på hvor stor del av variablene som er grunnlaget for gruppen, hvor f.eks. 1 tilsvarer 100%, 0.5

tilsvarer 50% og 0 tilsvarende 0%. Den beregnes ved å dele intervallet mellom den minste og største variabelverdien til gruppen på intervallet mellom den minste og største verdien i hele variabelskalaen (ESRI 2014b). I gruppe 1 presentert i figur 2.9a er for eksempel share-verdien til ruhetsvariabelen cirka 13% og kalkulert som følger:

$$Share_{Ruhet} = \frac{(0.3517 - 0.2211)}{(1 - 0)} = \frac{0.13}{1} = 0.13 = 13\%$$

Med andre ord er altså kriteriet for at en elv eller bekk skal plasseres i denne gruppen at den må ha en ruhetsverdi på mellom 0.2211 og 0.3517, som er 13% av ruhetsskalaen. R^2 gir på sin side en indikasjon på hvor gode de ulike attributtene er på å skille ut distinkte grupper. En ønsker her å ha en verdi så nær 1 som mulig (ESRI, 2014b).

2.4.2 Analyse i SPSS Statistics

I likhet med ArcGIS har også SPSS, et statistisk analyseprogram utviklet av IBM, verktøy for klyngeanalyse (IBM 2012a). Formålet med disse verktøyene er å identifisere og gruppere like verdier basert på forskjellige variabler (IBM 2012a), altså ikke ulikt Grouping Analysis verktøyet i ArcGIS (ESRI 2014b). Fordelen med verktøyet i ArcGIS kontra SPSS er den romlige biten, hvor en kan bruke romlig nærhet som et kriterium i analyseprosessen (ESRI 2014a; ESRI 2014b), og generelt bedre integrasjon i arbeidsflyten i ArcGIS. Av verktøyene i SPSS er det i hovedsak K-Means Cluster og TwoStep Cluster som har likhetstrekk med Grouping Analysis i ArcGIS.

K-Means verktøyet baserer seg ikke uventet på K-Means algoritmen, som er forklart i forrige delkapittel. TwoStep verktøyet fungerer på en litt annen måte, men essensen er stort sett den samme. Som navnet tilsier er dette en todelt prosess hvor datasettet først brytes opp i mer egnede klynger, som så slås sammen til større og større klynger, samtidig som intern likhet og ekstern ulikhet i størst mulig grad bevares (IBM 2012b). Fordelene til dette verktøyet kontra K-Means, er at verktøyet selv kan bestemme antallet nødvendige grupper, og at det kan analysere kontinuerlige og kategoriske variabler samtidig. Det har også mulighet for å ekskludere utliggere og ekstremt usannsynlige verdier (IBM 2012b).

Resultatet fra disse verktøyene er på samme måte som Grouping Analysis verktøyet i ArcGIS et nytt felt i datasettet som beskriver hvilken gruppe hvert enkelt objekt tilhører. I ArcGIS opprettes imidlertid en helt ny tabell med ferdig symbolikk. Tabellene fra SPSS kan importeres

i ArcGIS, og ved hjelp av vanlig tabellkobling kan gruppetilhørigheten til hvert objekt overføres til det opprinnelige datasettet i ArcGIS og brukes videre på samme måte som resultatet fra Grouping Analysis. Selv om verktøyene i SPSS også gir en oppsummerende rapport av analysen i tillegg til selve resultatet, er rapporten fra Grouping Analysis verktøyet mer utfyllende og detaljert.

3 Datagrunnlag og bearbeiding

Dette kapittelet tar i hovedsak for seg arbeidsflyten i ArcGIS, fra innsamlingsprosessen, via bearbeiding av kildemateriell, til kalkulering av variabler for bruk i analysedelen. Først evalueres relevante kildedata. Videre blir egnede data bearbeidet, og til slutt blir det beregnet variabler som kan brukes i analysene.

3.1 Kartlegging av nødvendige data

Den beste landsdekkende terrengmodellen til nå i Norge har en romlig oppløsning på 10 meter (Statens Kartverk 2014b), noe som for en rekke formål, og spesielt skredkartlegging er for dårlig (Berthling 2013). Noen områder har terrengmodeller med bedre oppløsning, som den for Trondheim (se kapittel 3.3.1), men det finnes altså ingen landsdekkende terrengmodell med en tilfredsstillende nøyaktighet for avanserte analyser. Statens Kartverk startet imidlertid nylig planleggingen av en ny nasjonal terrengmodell med en oppløsning på 1 meter, tilsvarende den som vil bli brukt i denne oppgaven, kalt «Nasjonal Detaljert Høydemodell» (Li 2013, Statens Kartverk 2014a). Dette skal i følge Statens Kartverk (2014a) bidra til å sikre mennesker og verdier, og har vært etterspurt blant både offentlige og private aktører.

Det jeg ville med denne oppgaven var å ta i bruk de beste data som det var mulig å få tak i, for å svare på problemstillingen. For modellering av terrenget er dette i Trondheim en LiDAR-basert punktsky som har en potensiell romlig oppløsning på under 1 meter. Når jeg her snakker om *potensiell* oppløsning er det fordi en laserderivert punktsky ikke har en uniform oppløsning. Oppløsningen her kan sies å være den gjennomsnittlige avstanden mellom hvert punkt i punktskyen. Denne avstanden er imidlertid ikke lik over hele området, og en må da avgjøre hvor mange punkter per celle en vil bruke til å interpolere høyden til en raster-basert terrengmodell. Jo flere punkter per celle en bruker, desto mer nøyaktig vil terrengmodellen bli (Liu et al. 2007).

Siden det i hovedsak var elver og bekker som skulle undersøkes, var det naturligvis også behov for et fluvialt datasett av høy kvalitet. Uten et fluvialt datasett som samsvarer med oppløsningen til terrengmodellen vil en høyoppløst terrengmodell være relativt bortkastet og kunne føre til grove feilkilder, noe vi skal se senere, og som diskuteres i kapittel 5. Jeg vurderte to lett tilgjengelige hydrologiske datasett som aktuelle, det hydrologiske datasettet i Felles Kartdatabase (FKB) og Elvenettverksdatabasen (ELVIS), fra henholdsvis Statens Kartverk og

NVE. Disse datasettene kan i utgangspunktet virke ganske like, mens de i realiteten ikke er det. De to datasettene har både fordeler og ulemper, noe som belyses senere i dette kapittelet.

Det er også mulig å generere et hydrologisk datasett fra en høyoppløst terrengmodell ved hjelp av verktøy i ArcGIS. Jeg undersøkte om dette lot seg gjøre for et så stort område som hele Trondheim kommune. Det viser seg imidlertid at selv om det er gjennomførbart, krever det en omfattende manuell redigering av det resulterende linjedatasettet. Dette er fordi det ikke tas høyde for stikkrenner, bruer og andre elementer i terrengmodellen (en uunngåelig effekt av LiDAR teknologien, filtrering av punktene og interpoleringen av terrengmodellen). Det finnes også andre mer avanserte verktøy som gjør det mulig å overstyre verktøyet i ArcGIS og som kan ta høyde for slike problemer (TauDEM 2014), men for et så stort område som hele Trondheim kommune vil dette fremdeles være en svært tidkrevende prosess. For et mindre område hadde det derimot vært høyst aktuelt.

For å finne ut hvilke områder som var aktuelle å undersøke nærmere måtte jeg også ha data om registrerte kvikkleiresoner. NVE har som tidligere nevnt, i samarbeid med en rekke andre instanser, utarbeidet en oversikt over blant annet kvikkleiresoner, i store deler av Norge. Denne oversikten finnes også som nedlastbart datasett og inneholder en rekke metadata som beskriver de aktuelle kvikkleiresonene (NVE 2013).

Jeg har også brukt Statens Kartverks FKB til å visualisere andre elementer, som for eksempel bygninger. Siste versjon av FKB er fra 2013, men selve databasen inneholder data fra 2014 og tidligere, ettersom de ulike datasettene i databasen revideres løpende og uavhengig av hverandre (Statens Kartverk 2014c).

3.2 Innsamling av data

Siden oppgaven baserer seg på allerede tilgjengelige data, har jeg ikke hatt behov for å selv gjennomføre datafangst. Det aller meste av data som er brukt i oppgaven er tilgjengelig hos Norge Digitalt, som er den nasjonale databasen for stedfestet data. Norge Digitalt er basert på samarbeidet mellom offentlige etater for å tilgjengeliggjøre stedfestede data i et standardisert format (SOSI), som en del av Geodataloven fra 2010 (Norge Digitalt 2014; Lovdata 2010). Jeg har fått tilgang til denne databasen gjennom Geografisk institutt på NTNU. Det er bare grunnlaget for terrengmodellen, altså punktskyen fra flybåren-LiDAR, som ikke er hentet fra Norge Digitalt. Denne punktskyen er fra Trondheim kommune.

3.3 Evaluering av kildedata

Ikke alle kildedata egner seg for bruk i en analyse som dette. I dette kapitlet undersøker jeg om de datasettene jeg har tilgang til er gode nok, og hva som eventuelt må gjøres av bearbeiding for at analysen skal la seg gjennomføre.

3.3.1 LiDAR Punktsky

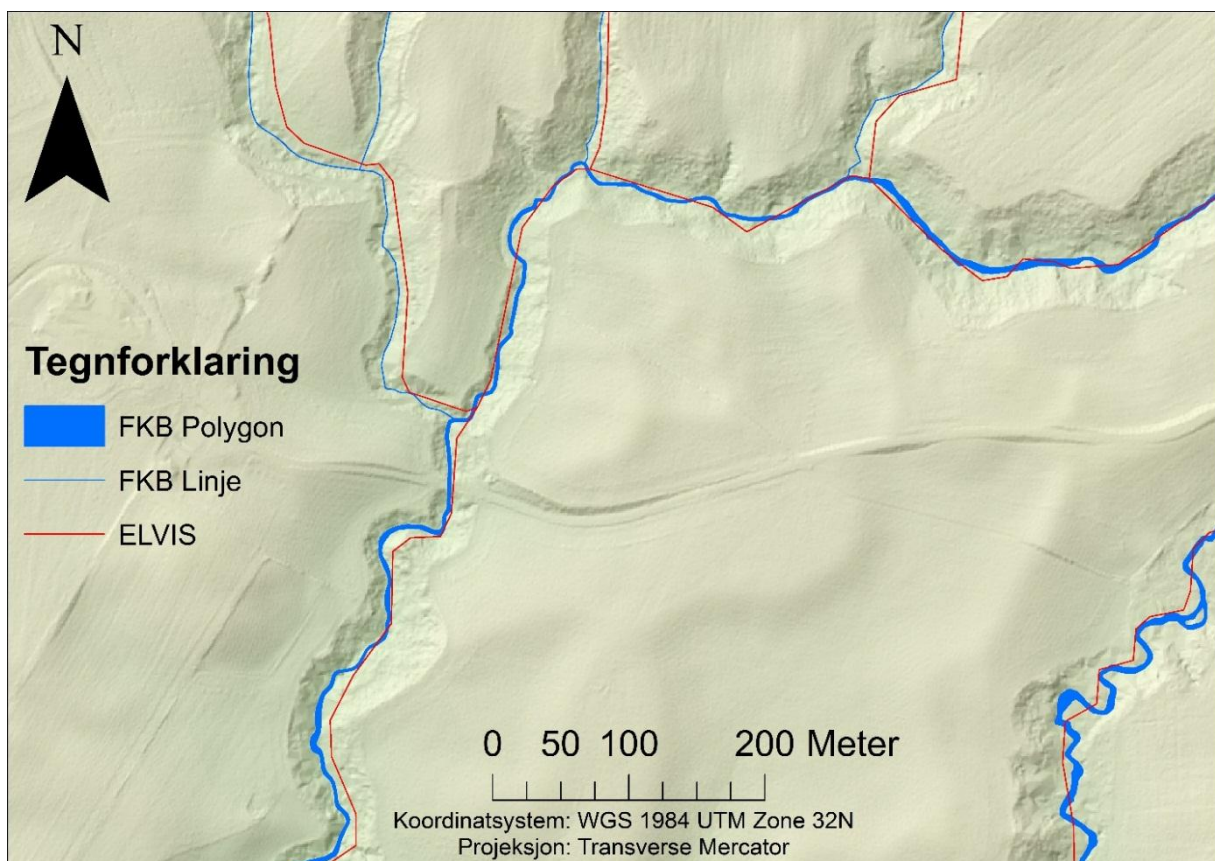
LiDAR punktskyene fra Trondheim kommune ble levert i LAS-format. Det var ingen metadata knyttet til filene så det var vanskelig å si noe om nøyaktigheten på måleinstrumentene og målingene. Datasettet var allerede bearbeidet og klassifisert i standardiserte klasser, men det var ingen informasjon om hvilke filtreringsmetoder som var brukt for å klassifisere punktskyen. Jeg ble derfor nødt til å gå ut i fra at klassifiseringen av datasettet var bra nok til mitt formål, og basere den videre bearbeidingen av datasettet på generell litteratur og statistisk informasjon som kan beregnes direkte fra punktskyen (se kapittel 3.4.1).

3.3.2 Data om fluviale systemer

Tidligere ble det nevnt at jeg hadde to muligheter når det gjaldt lett tilgjengelige fluviale datasett for elver og bekker, et fra Statens Kartverk sin FKB, og et fra NVE kalt ELVIS. Begge datasettene innehar en del fordeler og ulemper og dekker derfor ulike behov. Formålet med ELVIS er ifølge NVE (2009) å ha et landsdekkende nettverk av alle vassdrag med tilhørende metadata om de forskjellige strekkene, noe som blant annet muliggjør avanserte analyser. I utgangspunktet er dette akkurat det som behøves for analysen i denne oppgaven, et sammenhengende nettverk av alle Trondheims elver og bekker, i linjeformat. Svakheten avdekkes imidlertid med en gang en visualiserer datasettet i et GIS. ELVIS datasettet baserer seg nemlig på Statens Kartverk sine N50 kartdata. Data som ifølge Statens Kartverk (2014d) har en nøyaktighet på omlag 50 meter, og følgelig er kraftig generalisert i forhold til de opprinnelige dataene i FKB. Jeg valgte derfor å utelukke ELVIS til fordel for FKB, som har en mye høyere nøyaktighet på om lag 2 meter (Statens Kartverk 2013a). Ulempen til FKB virker i hovedsak å være hvorfor ELVIS i utgangspunktet ble opprettet, nemlig at det ikke er et komplett nettverk av elver og bekker i linjeformat. I FKB er mindre vassdrag representert med linjer, mens større vassdrag og innsjøer er representert med flater og kantlinjer der hvor ELVIS

hadde matematisk genererte midtlinjer (NVE 2009). Dette gjør det vanskelig å utføre avanserte analyser på hele FKB datasettet på en gang, ettersom flatene først må konverteres til linjeformat. Det er også vanskelig å finne informasjon om hva som ligger til grunn for skille mellom linjer og flater i dette datasettet.

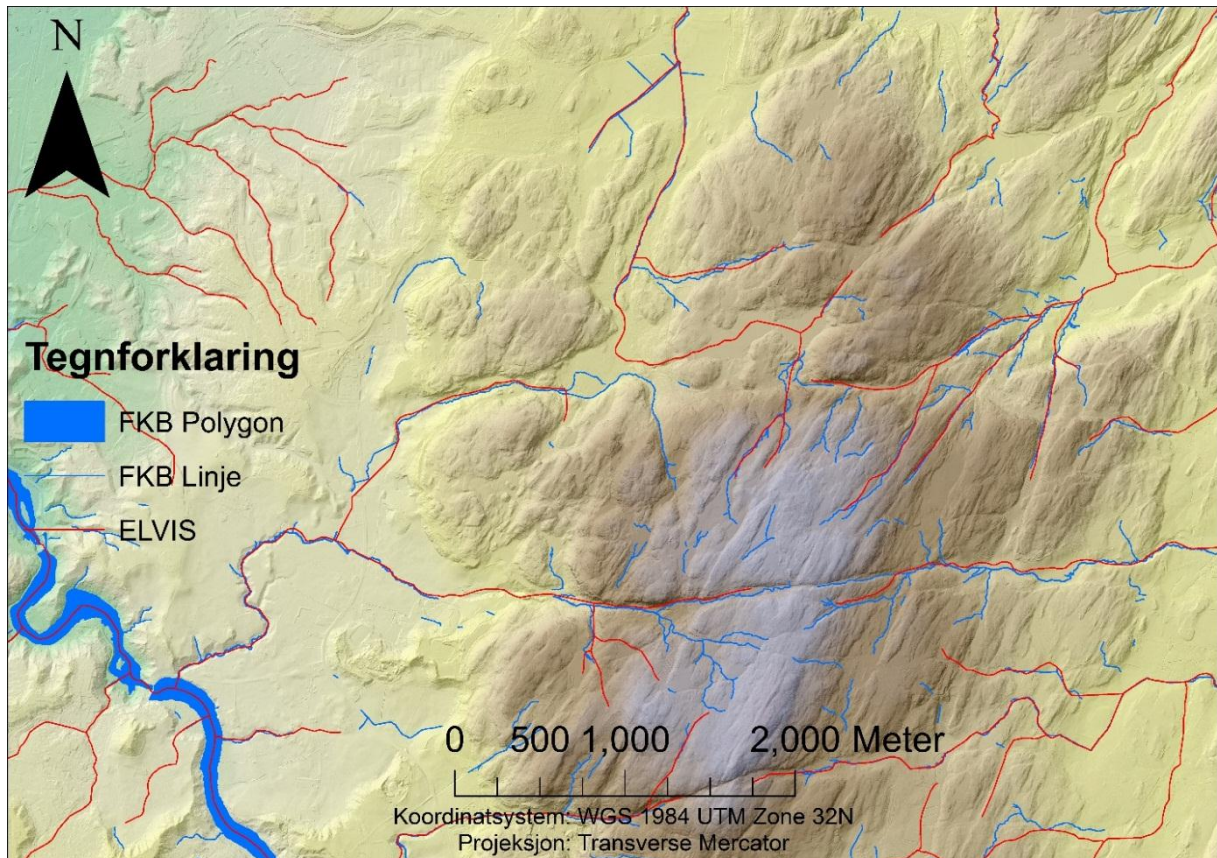
I figur 3.1 ser vi hvordan linjene og flatene fra FKB i mye større grad følger terrenget derivert fra LiDAR, mens linjene fra ELVIS mange steder tar «snarveier» over bakker og skråninger, og i stor grad er preget av generalisering. Legg spesielt merke til hvordan elven nederst til høyre meandrerer mer naturlig i FKB, i forhold til ELVIS hvor elven nesten har blitt generalisert til rette linjer med spisse vinkler.



Figur 3.1: Forskjellen i oppløsningen til de to fluviale datasettene kommer godt frem når de legges over terrenget.

En annen ulempe, som kan tilskrives begge datasettene er at de begge mangler noen elver og bekker. Ingen av datasettene er altså komplette. For eksempel inneholder ELVIS elver og bekker i noen områder, som ikke finnes i FKB, samtidig som ELVIS også mangler en del mindre elver og bekker som finnes i FKB. Dette kommer tydelig frem på kartet i figur 3.2, hvor

elvene og bekkene i området øverst til venstre ikke finnes i FKB overhode, mens FKB inneholder en rekke små bekker som ikke eksisterer i ELVIS. Dette er noe påfallende ettersom ELVIS i utgangspunktet skal være basert på FKB, ifølge NVE selv (NVE 2009).

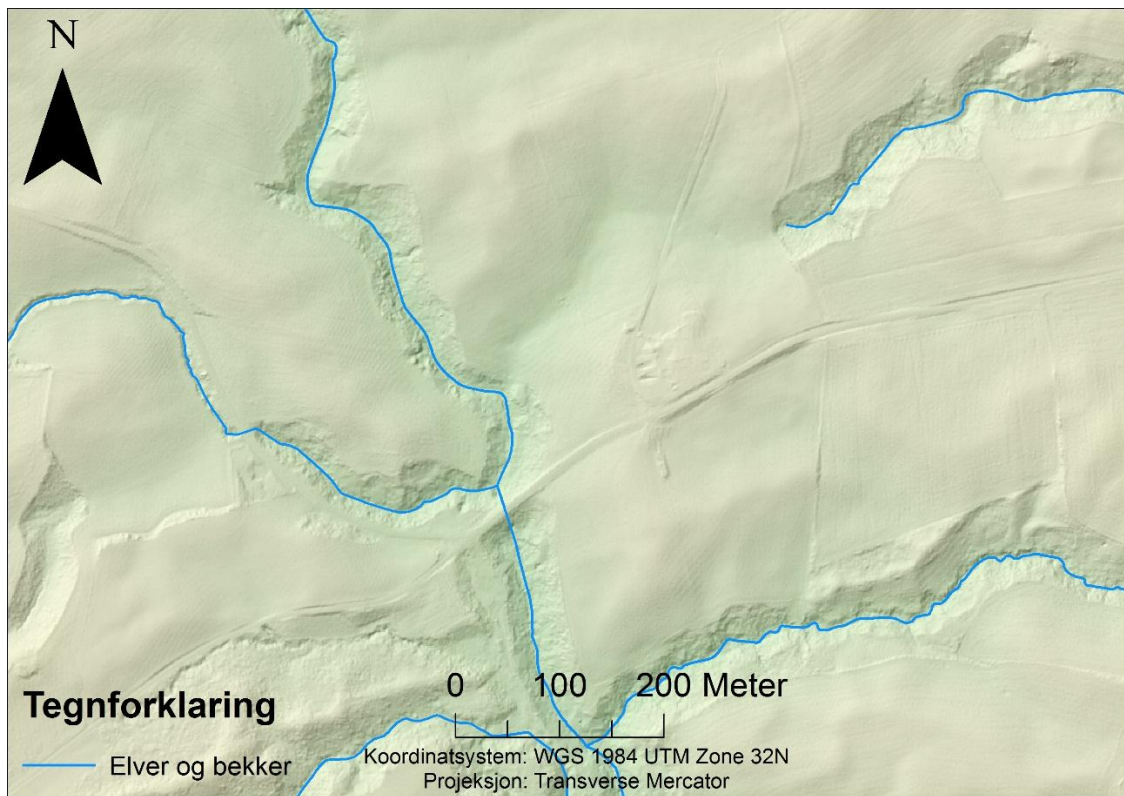


Figur 3.2: Begge de fluviale datasettene mangler elver og bekker.

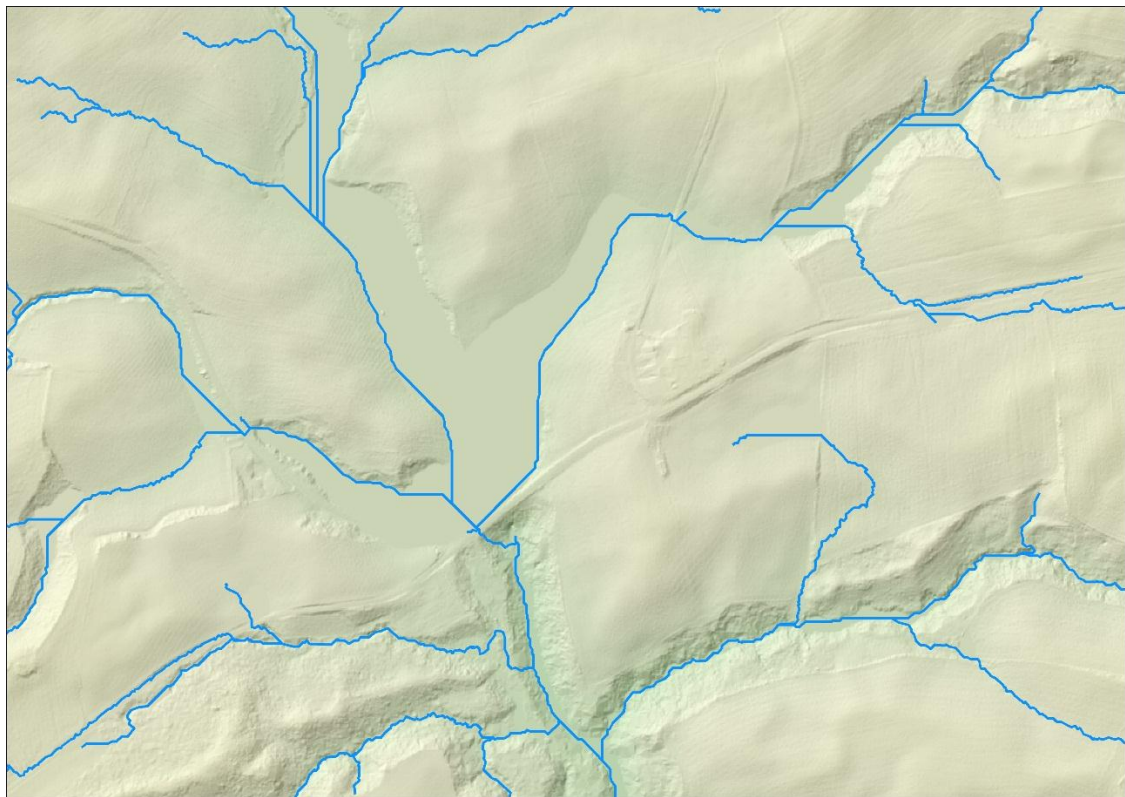
Utfordringen ved bruk av FKB var at store deler av datasettet først måtte konverteres fra flater til linjer før det kunne brukes i analysen, noe som viste seg å være vanskeligere enn først antatt. Hvordan jeg gikk frem for å få dette til forklares i kapittel 3.4.2.

Som nevnt evaluerte jeg også å bruke et elve- og bekkenettverk kalkulert ut fra terrenngmodellen med verktøyet i ArcGIS. Etter mye prøving og feiling ble dette linjedatasettet, i likhet med ELVIS evaluert som for dårlig for bruk i analysen. Figur 3.3 illustrerer noen av problemene som oppsto underveis i prosessen. Som en ser har en bro over en av elvene gjort at verktøyet har tolket det dit hen at terrenngmodellen her må fylles inn. Samtidig er også mange av de kalkulerte elve- og bekkeveiene åpenbart urealistiske.

(a)



(b)



Figur 3.3: Her vises forskjellene mellom det fluviale datasettet fra FKB (a) og det som ble prøvd kalkulert ut fra terrenngmodellen (b). Begge kartene er fra samme område.

3.3.3 Kvikkleiresoner og grunnkart

NVEs datasett for kvikkleiresoner inneholder informasjon om hvilke områder som har kvikkleire. I tillegg er alle disse områdene klassifisert på bakgrunn av faregrad, konsekvens og risiko. Faregrad forstås her som sannsynligheten for at et nytt skred utløses, mens konsekvens forstås som effekten av et slikt skred på mennesker, bygninger, infrastruktur o.l. Risiko på sin er en integrert indeks som kombinerer både faregrad og konsekvens (Gregersen 2008). Data om disse sonene ble i hovedsak brukt som en del av analysen, men fungerte også som en naturlig avgrensning av analyseområde, ettersom størsteparten av Trondheim kommune ikke inneholder kvikkleire, og derfor faller utenfor min problemstilling.

De mest grunnleggende topografiske kriteriene for kvikkleiresonekartleggingen er i stor grad knyttet til terreng høyde. For eksempel må jevnt hellende terreng ha en skråningsgradient på 1:15 eller større for å bli videre evaluert, eller en terreng høydeforskjell på 10 meter eller mer (Gregersen 2008). I tillegg til dette er det gjennomført befaring og feltundersøkelser før de endelige kvikkleireutsatte områdene ble kartlagt, og i hver sone er det som regel gjennomført minst én grunnboring (NVE 2011). Dette vil ifølge rapporten til NVE og NGI inkludere de aller fleste områdene som er potensielt utrygge for store skred, men det nevnes at skred også kan forekomme i områder som ikke er kartlagt. Det tas heller ikke høyde for utløpsdistansen til et eventuelt skred, så områder utenfor de kartlagte kvikkleiresonene kan også bli berørt av skred utløst innenfor kartlagte soner (Gregersen 2008).

Kvikkleiresonene er som nevnt tidligere, klassifisert i henhold til tre indekser som en del av sikringsprosessen mot nye kvikkleireskred. De ulike indeksene beregnes ut i fra ulike kriterier med forskjellig vektning, kort beskrevet i tabell 3.1 (Gregersen 2008).

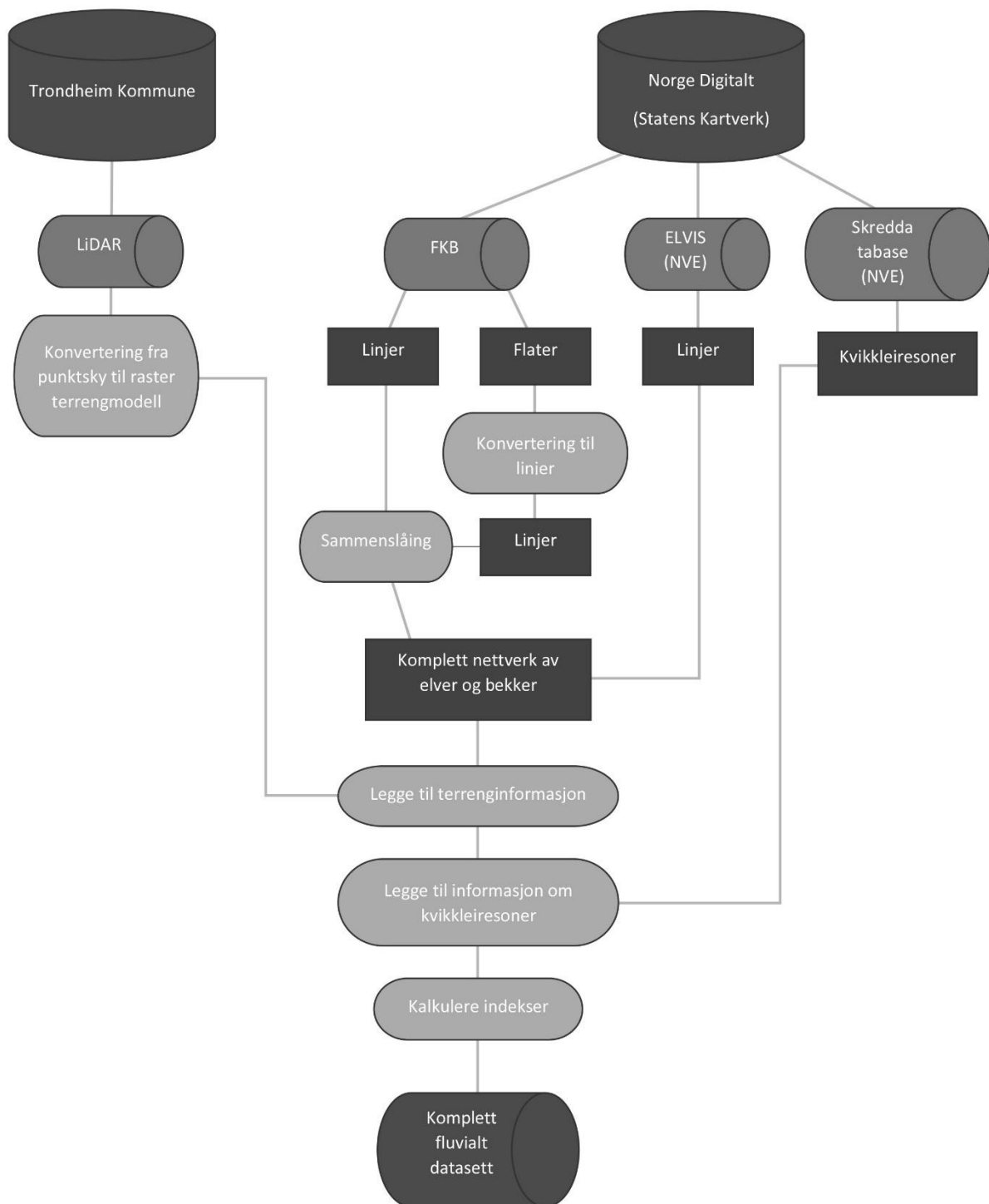
Tabell 3.1: NVE og NGIs Kriterier for faregrad- og konsekvensklassifisering av kvikkleiresoner.
Kilde: Gregersen 2008

Faregrad (1-3)	Vekt	Skadekonsekvens (1-3)	Vekt
Tidligere skredaktivitet	1	Antall boligenheter	4
Skråningshøyde/topografi	2	Antall personer i næringsbygg	3
Terrengsenking (forkonsolidering)	2	Annen bebyggelse	1
Poretrykk (over-/undertrykk)	3 / -3	Veier	2
Kvikkleiremektighet	2	Toglinjer	2
Kvikkleiresensitivitet	1	Kraftlinjer	1
Erosjon i vassdrag	3	Konsekvens av oppdemming/flom	2
Inngrep (forbedring/forverring)	3 / -3		

I denne oppgave er det først og fremst erosjon i vassdrag som er interessant å se på. Dette er ifølge tabell 3.1 og rapporten til NVE og NGI en av de viktigste faktorene for faregradklassifiseringen (Gregersen 2008). Egne evalueringer fra feltobservasjoner ligger til grunn for kartleggingen av erosjonsforholdene. I faregrad 3 som er den høyeste faregraden påpekes det at erosjon tidligere har utløst skred, og at det i løpet av de siste årene har forekommet store utglidninger. I tillegg er det gjort få eller ingen sikringstiltak for å motvirke den pågående erosjonen, og vannet er misfarget grått. Faregrad 2 og 1 har noe mildere kriterier, men det påpekes at det også her kan forekomme erosjon som kan føre til utglidninger og utløsning av skred (Gregersen 2008). Elver og bekker i områder som er klassifisert med en høy faregrad kan derfor sies å være aktivt eroderende, og således antas å ha størst sannsynlighet for å utløse nye skred enn elver og bekker i områder klassifisert med en lavere faregrad.

3.4 Bearbeiding av data i ArcGIS

I dette delkapittelet går jeg gjennom bearbeidingsprosessen fra kildemateriell til endelig datasett, klart for analysing. Det var i all hovedsak det fluviale datasettet som behøvde mye bearbeiding for å kunne brukes til mitt formål. Flytdiagrammet i figur 3.4 viser en forenklet fremstilling av bearbeidingsprosessen.



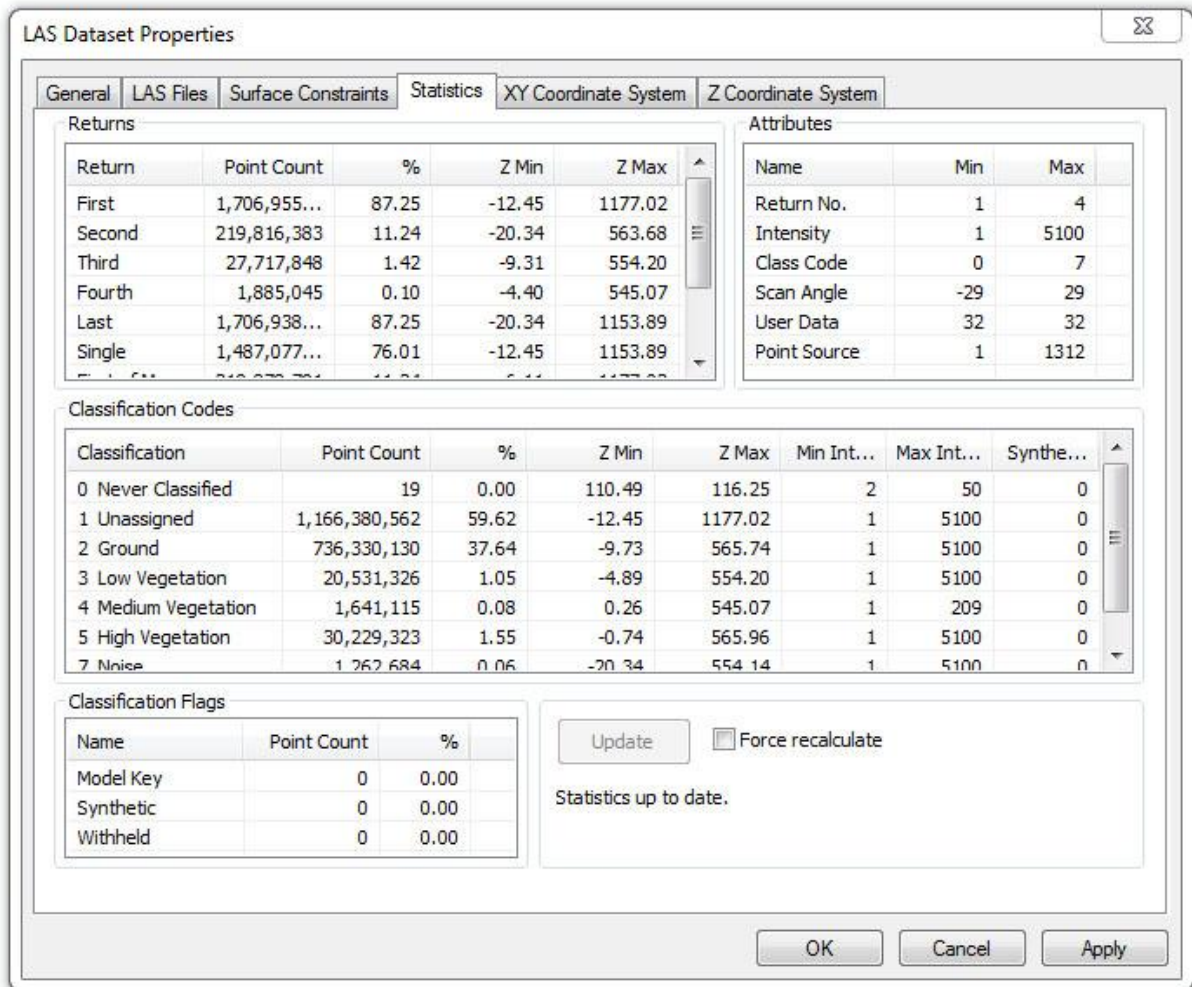
Figur 3.4: Flytdiagram som viser en grov forenkling av bearbeidingsprosessen, fra kildemateriell til ferdig bearbeidet datasett klart for analyse.

3.4.1 Interpolering av LiDAR punktsky til terrengmodell

Punktskyen fra Trondheim kommune ble levert i LAS-formatet, noe som gjør den enkel å importere i ArcGIS. Til tross for dette hadde ikke filene noe metadata inkludert. Det var ingen teknisk informasjon knyttet til målingene, eller hvem som faktisk har utført datainnsamlingen

og bearbeidingen. Det eneste konkrete jeg visste, var at punktskyen ble innsamlet på oppdrag av Trondheim kommune. En av ulempene med dette er at det er vanskelig å si noe om nøyaktigheten på målingene, som blant annet er avhengig av måleinstrumentene brukt i datainnsamlingen.

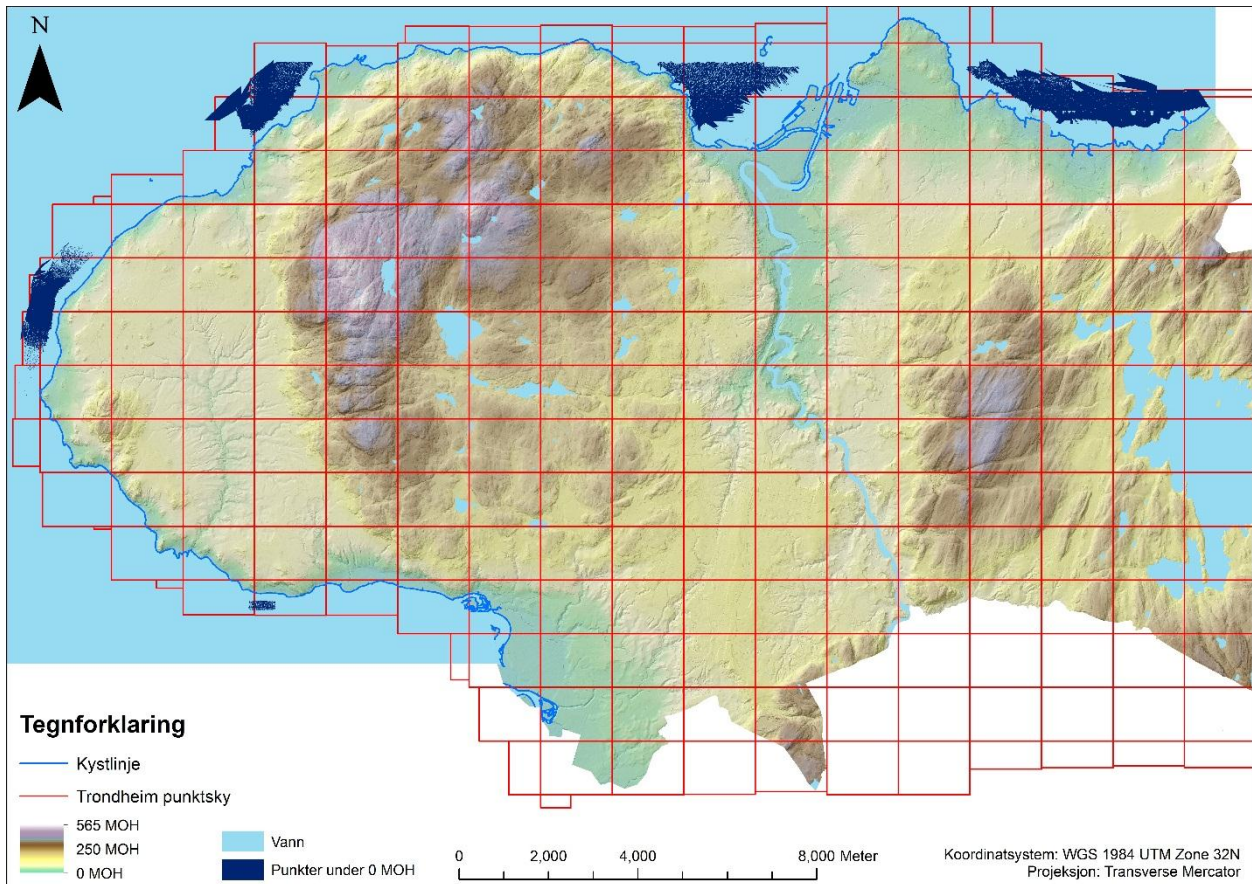
LAS filene importeres i ArcGIS ved å opprette et såkalt LAS-datasett. Her velges de LAS filene som er aktuelle, og hvilken projeksjon disse skal projiseres med. WGS 1984 UTM Sone 32 ble valgt for X og Y koordinatene, i tillegg til NN2000 for høydekoordinaten Z, som er den nyeste landsdekkende høydereferansen i Norge, og som på sikt skal erstatte den tidligere høydereferansen fra 1954 med oppdatert informasjon om landheving m.m. (Statens Kartverk 2014e). Videre ble LAS-filene tolket og statistikk kalkulert. Det som skjer da er at ArcGIS henter ut informasjon om hvordan punktskyen er klassifisert, hvor mange punkter som er tilstede i de forskjellige klassene, og en rekke andre statistiske data. Punktene får da en kode som tilhører en bestemt klasse, som for eksempel fast grunn (klasse 2), lav vegetasjon (klasse 3) eller «støy» (klasse 7). Disse klassene baseres på data fra retursignalene og ulike filtreringsteknikker for å skille objekter fra hverandre (Liu 2008), og klassenummer følger somregel en definert standard (ESRI 2013d). Figur 3.5 viser hvordan dette ser ut i ArcGIS. Vi ser her blant annet at det er 736.330.130 punkter som representerer jordoverflaten i Trondheim, mens det totalt finnes over 1.7 milliarder punkter i hele punktskyen. Siden intensjonen var å lage en modell av jordoverflaten var det punktene klassifisert som nettopp dette som ble brukt videre, mens de resterende punktene i andre klasser ble forkastet. Hvis vi deler antallet punkter på arealet av Trondheim kommune (324 km²) (Trondheim kommune 2014), kommer vi frem til at det teoretisk sett skal være litt over 2 punkter/m² i punktskyen.



Figur 3.5: Kalkulert statistikk for punktskyen som dekker Trondheim kommune.

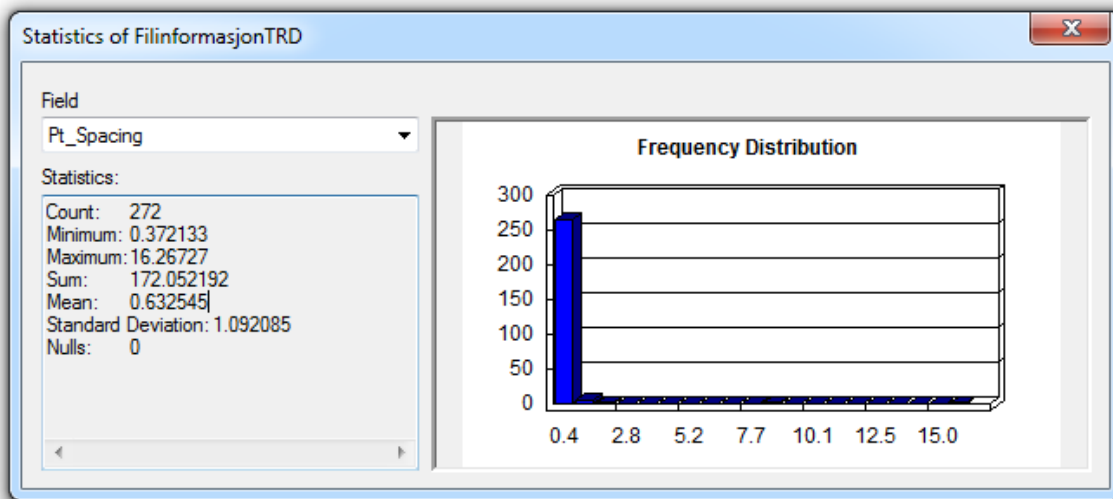
I figur 3.5 ser vi også en effekt av automatisk klassifisering. I klasse 2 som i utgangspunktet skal representere jordoverflaten, er den laveste verdien -9.73 meter. Altså er det laveste punktet som befinner seg innenfor denne klassen nesten 10 meter under havnivå. Etersom store deler av punktskyen også dekker Trondheimsfjorden er det naturlig å anta at disse «falske» verdiene befinner seg nettopp i fjorden og ikke på land. Etter at terrenngmodellen var ferdig interpolert sjekket jeg derfor hvor cellene med disse verdiene befant seg. Dette ble gjort ved å reklassifisere cellene i den ferdig interpolerte terrenngmodellen til to klasser, med henholdsvis negative og positive verdier, altså en klasse for verdier henholdsvis over og under havoverflaten. Ved å undersøke dette mot kystlinjedata fra FKB ble det bekreftet, som antatt, at alle negative verdier befant seg i havområder, altså i områder som ikke er av betydning for problemstillingen i oppgaven (se figur 3.6). Noen unntak var det, men ved manuell inspeksjon kom det klart frem at alle områdene med negative verdier som befant seg på land enten var

tunnel-innkjørsler eller det jeg antok var byggeprosjekter hvor det er gravd under havnivå. Heller ingen av disse stedene var av betydning, ettersom de ikke befant seg innenfor de kartlagte kvikkleiresonene eller hadde vannveier rennende over dem, og således ikke kunne påvirke det fluviale datasettet.

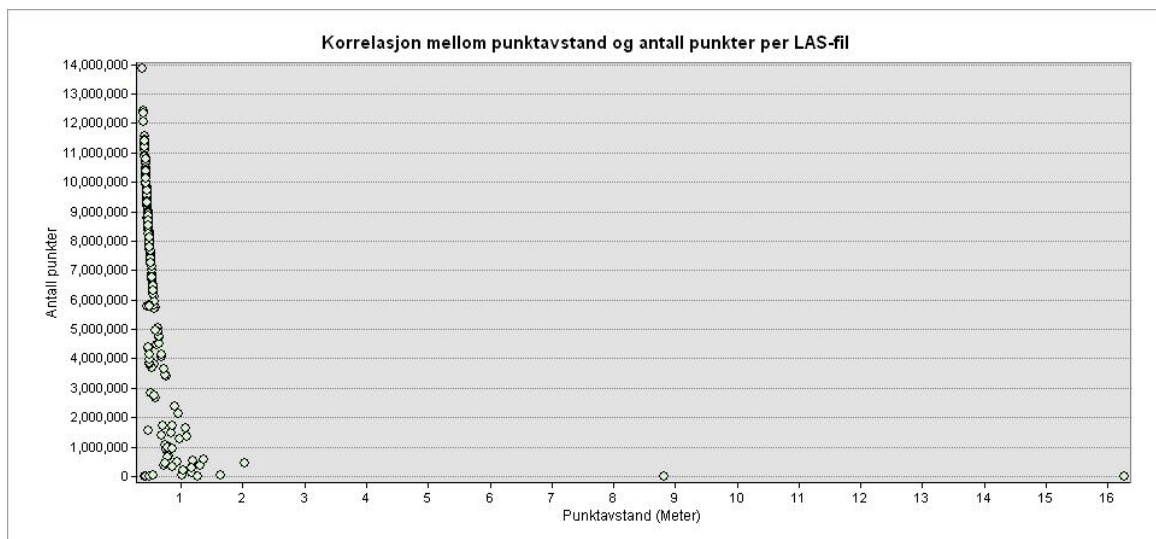


Figur 3.6: Ferdig interpolert terrengmodell. Hvert røde rektangel representerer én LAS-fil. De mørkeblå feltene viser de cellene i terrengmodellen som befinner seg under havnivå.

Videre brukte jeg et verktøy som beregner en del nyttig statistisk informasjon for hele punktskyen (ESRI 2013f). Grunnen til at dette ble gjort var for å finne den gjennomsnittlige avstanden mellom hvert punkt i datasettet. Dette fungerer som en pekepinn på hvor nøyaktige terrengmodeller punktskyen tillater oss å lage (se kapittel 2.2.2) (Liu et al. 2007; Aronoff og Petrie 2005). Datasettet for hele Trondheim viser seg å ha om lag 60 centimeter gjennomsnittlig avstand mellom hvert punkt i punktskyen, noe som ikke er langt ifra 2 punkter per kvadratmeter, som tidligere antatt. I realiteten er punktavstanden noe lavere enn dette i de aller fleste områdene. Det viser seg i tillegg å være en korrelasjon mellom antall punkter i en gitt LAS-fil og punktavstand. Jo flere punkter, desto mindre avstand mellom dem (figur 3.7 og 3.8).



Figur 3.7: Statistisk informasjon for punktskyen. Her vises punkttettheten til punktskyen. Minste, største og gjennomsnittlig punktavstand.



Figur 3.8: Hvert punkt i grafen representerer én enkelt LAS fil. Her vises sammenhengen mellom antall punkter og punktavstand, i de ulike LAS-filene.

Figur 3.9 viser hvordan punktskyen ser ut importert i ArcGIS og filtrert til kun å vise punkter som representerer jordoverflaten, før terrenngmodellen interpoleres. De hvite partiene er områder hvor punktene har blitt filtrert bort i filtrering- og klassifiseringsprosessen, og i dette tilfellet er det stort sett konturene av bygninger og Nidelven som meandrerer rundt Øya i vi ser.



Figur 3.9: Et utsnitt av den filtrerte punktskyen, visualisert i ArcGIS.

Basert på informasjon om punkttetthet interpolerte jeg en rasterbasert terrengmodell for hele Trondheim kommune. Etersom den gjennomsnittlige punkttettheten var på cirka 60 centimeter ble 1 meter valgt som oppløsning for terrengmodellen. Oppløsningen på en LiDAR-derivert terrengmodell i rasterformat bør alltid være lik eller lavere enn den gjennomsnittlige punkttettheten til punktskyen, for å få en så nøyaktig terrengmodell som mulig (Liu et al. 2007).

For å lage en rasterbasert terrengmodell basert på ujevnt distribuerte punktdata må en bruke en interpoleringsalgoritme for å anta høydedata i områder som ikke har målinger (Lloyd og Atkins 2006), for eksempel i de hvite områdene i figur 3.9. Når punktavstanden er veldig liten, som den typisk er i en LiDAR punktsky, så anbefaler Lloyd og Atkinson (2002) at det brukes en enkel interpoleringsmetode. De kanskje mest brukte interpoleringsalgoritmene er Inverse-Distance Weighting (IDW) og kriging (Longley et al. 2011). Det er gjort en del forsøk på hvilken interpoleringsalgoritme som er best for LiDAR-datasett av ulik karakter og oppløsning, men ulike undersøkelser gir forskjellige resultater (Lloyd og Atkinson 2002; Ali 2004; Su og Bork 2006), og det påpekes at forskjellene uansett ikke er veldig store. Lloyd og Atkinson (2002) konkluderte sine undersøkelser med at kriging ga mer nøyaktige resultater enn IDW i

datasett med stor punktavstand, mens IDW var den foretrukne metoden når punktavstanden var liten. Hver celle i rasteret vil da få tildelt en høyde basert på gjennomsnittshøyden til de nærliggende punktene hvor verdien til de nærmeste punktene vektet høyere enn de som ligger lenger unna (se kapittel 2.2.4 for mer informasjon om interpolering) (Longley et al. 2011).

Verktøyet i ArcGIS for interpolering direkte fra LAS-datasett til raster støtter kun IDW av de to nevnte interpoleringsalgoritmene (ESRI 2012a). Dette ble nødvendigvis også den brukte metoden, ettersom den er mye brukt og gjør en god jobb på datasett av denne typen, og fordi den ikke krever innspill fra brukeren sin side, og dermed ikke kan føre til bruker-påførte feilkilder i terrengmodellen (Lloyd og Atkinson 2006).

Selv om det strengt tatt ikke var nødvendig for selve analysen ble et maskeringsverktøy til slutt brukt for å fjerne de områdene av terrengmodellen som ikke ligger innenfor Trondheim kommune.

3.4.2 Fra flater til linjer

Som forklart tidligere er det fluviale datasettet i FKB delt opp i to formater. Det ene består av linjedata mens det andre består av flater. Den største utfordringen med å bearbeide disse datasettene var å få konvertert flatene til linjer. Dette var nødvendig for at analyseverktøyet skulle kunne analysere et enkelt stort linjedatasett istedenfor en kombinasjon av linjer og flater, som ikke håndteres bra i konvensjonelle GIS.

De hydrologiske datasettene i FKB inneholder imidlertid ikke bare data om elve- og bekkefar, men også data om innsjøer, fjorder og hav. Siden det for denne oppgaven kun er elev- og bekkefar som er interessante for selve analysen, ble det første steget å skille bekker og elver fra resten av datasettene. Dette gjøres enkelt i ArcGIS ved seleksjon basert på en gitt attributtverdi. Det finnes en egen kolonne i attributt-tabellen som beskriver hva hvert objekt er for noe. Alle objekter som representerer elver og bekker har i denne kolonnen fått teksten «ElvBekk». En trenger derfor bare å velge alle linjer og flater som har denne teksten og eksportere disse til et nytt datasett. Dette måtte gjøres for både linje- og flatedatasettet, ettersom disse ikke er koblet sammen.

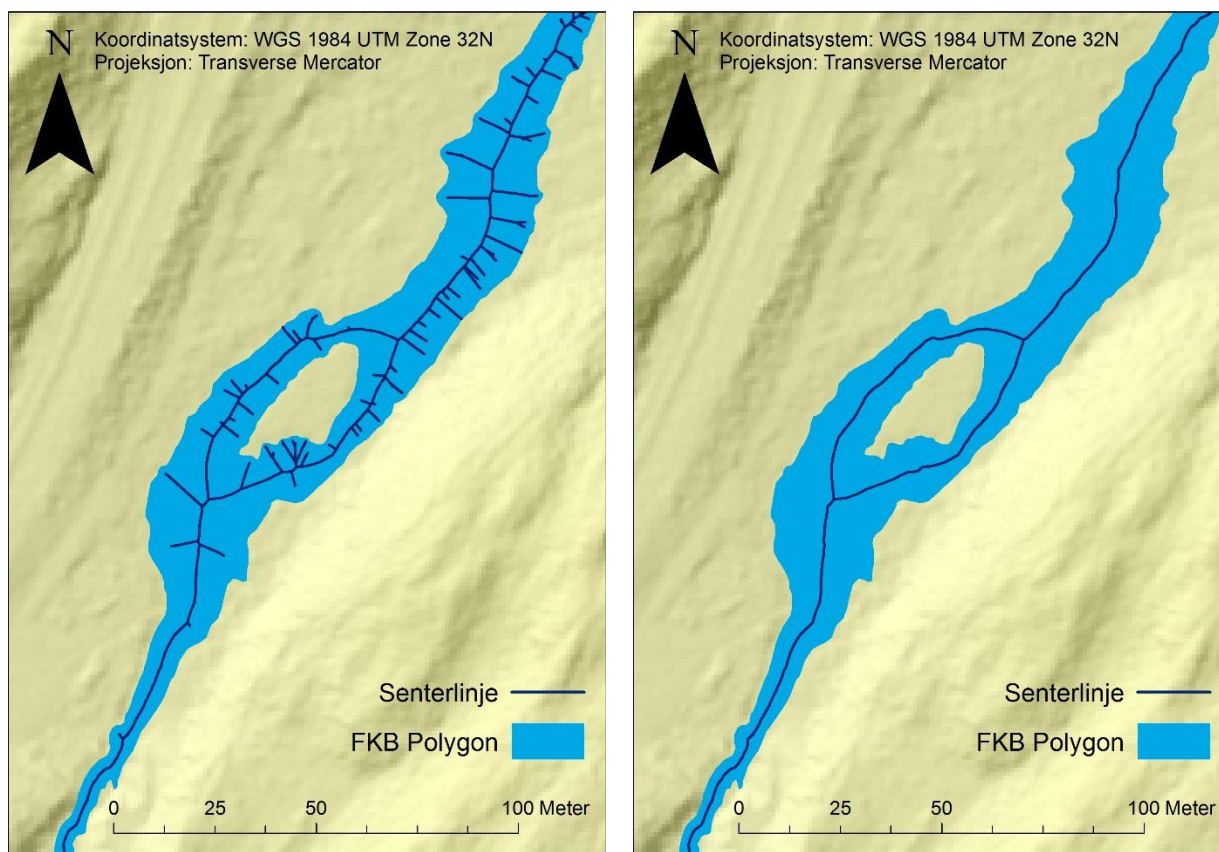
Neste steg ble å konvertere flatene til linjer. Dette viste seg å være vanskeligere enn først antatt. Etter mye prøving og feiling kom jeg over et brukerlagd verktøy kalt “Polygon to centerline”, som er laget ved hjelp av ModelBuilder i ArcGIS (Tomdilt 2011). ModelBuilder er kort fortalt

en applikasjon for geoprosessering som lar brukeren koble sammen de ulike verktøyene som allerede finnes i ArcGIS ved hjelp av et brukervennlig grensesnitt (ESRI 2011a). I stedet for å kjøre en og en operasjon manuelt kan en i ModelBuilder koble disse sammen og automatisere mye av prosessen. Den aktuelle modellen, er ment som et alternativ til verktøyet “Collapse Dual Lines to Centerline” i ArcGIS som også ble prøvd, uten gode resultater (Tomdilt 2011).

Før verktøyet ble brukt valgte jeg å fjerne Nidelven fra datasettet til tross for at dette også er en elv. Dette gjorde jeg ettersom den allerede er under overvåking og erosjonssikret flere steder (Trondheim kommune 2013; Skei 2009). Den er også vesentlig større enn alle andre elver og bekker i datasettet, og derfor lite sammenlignbar med resten av elvene og bekkene.

Verktøyet for generering av senterlinjer klarer ikke å lage senterlinjer på tvers av flater, og siden de fleste elvene i datasettet er bygget opp av mange ulike flate-segmenter måtte disse først slås sammen, noe som enkelt lar seg gjøre i ArcGIS ved hjelp av “Dissolve” verktøyet. Ved bruk av dette verktøyet slås alle nærliggende flater sammen til en sammenhengende flate (ESRI 2013g). I samme operasjon forsvinner også alle data tilhørende de ulike elve- og bekkesegmentene. Dette er imidlertid uunngåelig, da det uansett vil skje under konvertering av flater til linjer, i de neste stegene.

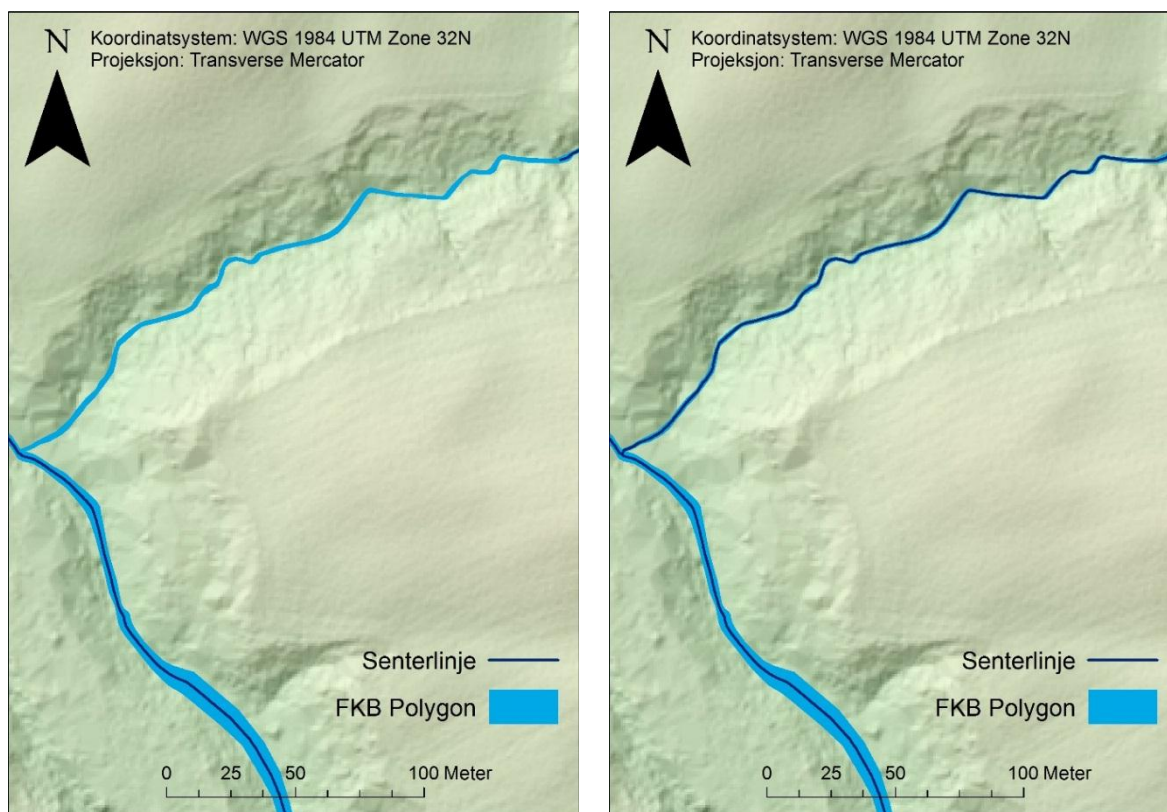
I praksis så er det to komponenter i verktøyet som må kjøres for å få et håndterbart sluttprodukt. Den første konverterte flatene til et slags skjelett bestående av cirka 750.000 linjesegmenter, mens den andre komponenten generaliserte disse linjesegmentene til et mye mer håndterbart datasett på rundt 6000 linjer. Denne generaliseringen har også en negativ effekt på datasettet. Mange av de flatene som var relativt tynne ble generalisert for mye, noe som gjorde at enkelte elver ble stykket opp, eller ble kortere enn i realiteten, eller rett og slett ble utelatt. I tillegg skjedde det motsatte for brede elver, hvor de i tillegg til senterlinjen fikk tilegnet en god del utstikkende linjesegmenter (se figur 3.10). De fleste elvene ble imidlertid konvertert meget bra, og en kan således se på verktøyet som et godt kompromiss mellom automatisering og kvalitet. En del manuell bearbeiding måtte imidlertid til for at de nye senterlinjene skulle bli mest mulig riktig i forhold til flatene de ble generert fra.



Figur 3.10: Manuell fjerning av utstikkende linjesegmenter. Figuren til venstre viser resultatet fra verktøyet som genererer senterlinjer. Figuren til høyre viser senterlinjene etter manuell bearbeiding.

Som en kan se i figur 3.10 gjør verktøyet en god jobb med å generere senterlinjer fra elveflatene, men i de partiene hvor elven er relativt bred var det nødvendig med manuell arbeid for å fjerne utstikkere. Dette gjøres enkelt ved å starte en redigerings-økt og velge de linjesegmentene en ønsker å fjerne og slette dem fra datasettet. Det er ganske åpenbart hvilke linjesegmenter en skal fjerne og hvilke en skal beholde, så til tross for at dette er en tidkrevende prosess, er det relativt enkelt å gjennomføre. Figur 3.11 viser imidlertid det motsatte problemet, hvor verktøyet har generalisert bort et over 100 meter langs elveleie. Å reparere feil som dette gjøres ved å legge til flere knekkpunkter³ til den eksisterende linjen, eller å opprette en helt ny linje. Flaten under brukes som referanse når disse legges til, slik at man får en linje som er mest mulig sentrert.

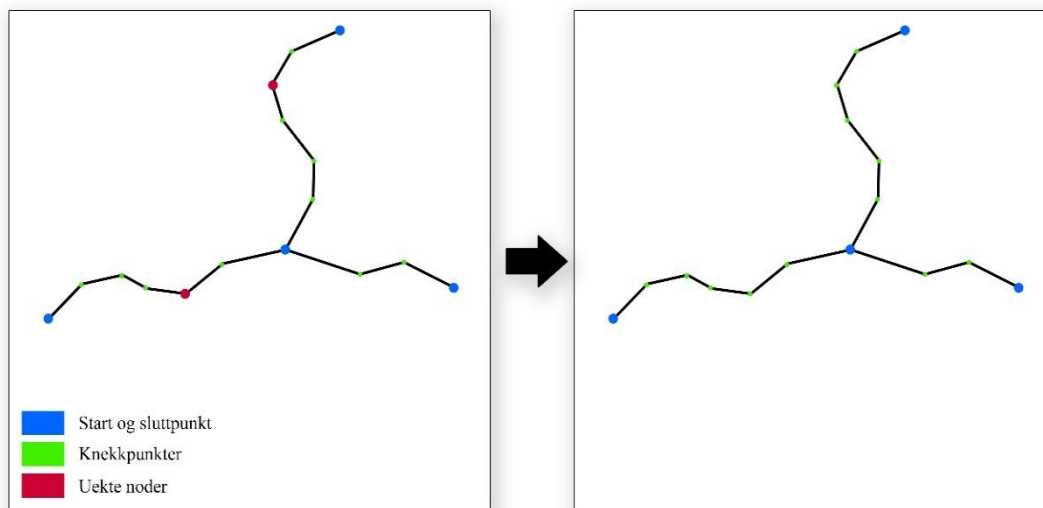
³ Punkter som definerer formen på en linje eller flate (Wade og Sommer 2006).



Figur 3.11: Manuell generering av senterlinjer som det automatiserte verktøyet ikke klarte å lage. Knekkpunkter blir lagt til den eksisterende linjen opppe til høyre i figuren til venstre, og ned til linjen til venstre i figurene.

Etter at det manuelle arbeidet var gjort ble verktøyet “Unsplit Line” brukt til å fjerne såkalte uekte noder (ESRI 2013h), på norsk gjerne kalt uekte knutepunkt (se figur 3.12). Uekte noder kan i et GIS forklares som punkter som kobler sammen to linjesegmenter, eller et endepunkt som kobler linjen sammen til seg selv, og må ikke forveksles med vanlige knekkpunkter (Wade og Sommer 2006). I praksis har en linje bare to noder, en for startpunkt og en for sluttpunkt. Punkter mellom start- og sluttpunkt kalles knekkpunkter og gjør at linjene kan ha en kurvet form. Problemet i en analyse slik som denne oppgaven baserer seg på, er at et linjesegmenter mellom to uekte noder oppfattes som en selvstendig elv eller bekk. I denne oppgaven er det imidlertid mer interessant å se på karakteristikene til hele elven eller bekken, noe som forutsetter at vi fjerner alle de uekte nodene mellom start og sluttpunkt (se figur 3.12).

Etter å ha fjernet alle de uekte nodene ble datasettet redusert til 3112 linjer, som representerer hele elve- og bekkefar. Av disse kommer 2736 direkte fra FKB linjedatasettet, mens 376 er senterlinjer generert fra FKB flatedata. Verktøyet unsplit line reduserte med andre ord genererte senterlinjesegmentene fra cirka 6000 til 376.



Figur 3.12: Fjerning av uekte noder med verktøy i ArcGIS. Røde punkter markerer uekte noder og deler i praksis linjene opp i to uavhengige linjesegmenter. Grønne punkter er knekkpunkter som definerer linjenes form.

Siden det er lettere å arbeide med ett enkelt fluvialt datasett enn to, slik data fra FKB er delt opp, kombinerte jeg de to datasettene til ett enkelt datasett. Dette gjøres etter genereringen av senterlinjer slik at alle elver og bekker er representert med samme format, med verktøyet kalt “Merge”, som sammenslår data og tilhørende attributt-tabeller. Samtidig er det en fordel å fortsatt ha kontroll på hvor de forskjellige objektene i det nye, sammenslåtte datasettet har sitt opphav, altså om en elv eller bekk kommer fra FKB sine linje- eller flatedata. Jeg opprettet derfor et nytt felt i hvert av de to datasettene før jeg sammenslo dem, kalt «Kombiner». Dette feltet skulle gi hver elv eller bekk en unik identitet i form av et tall. I det ene datasettet ble feltkalkulatoren brukt til å angi dette feltet verdien som ArcGIS automatisk genererer for hver punkt, linje eller flate; en sekvensiell nummerrekke fra 1 og opp til det totale antallet objekter i tabellen. I det andre datasettet brukte jeg et enkelt Python script til å fortsette denne numeriske rekken fra der den sluttet i det første datasettet.

```

Pre-Logic Script Code:
rec=0
def autoIncrement():
global rec
pStart = 277*
pInterval = 1
if (rec == 0):
rec = pStart
else:
rec += pInterval
return rec
Kombiner = autoIncrement()

```

* Siste verdi i forrige datasett

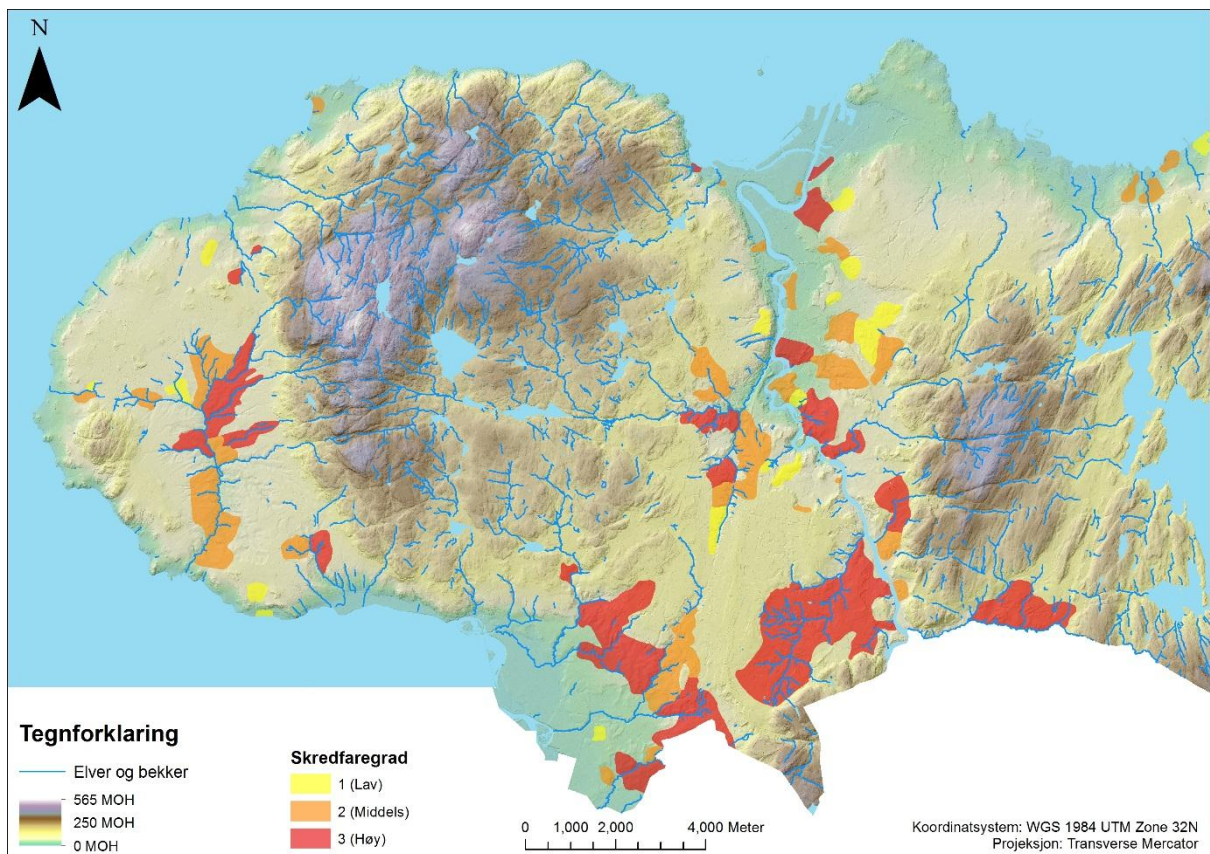
For å gjøre det enklere å sjekke akkurat hvilke elver som kom fra FKB sine linje og flate-data opprettet jeg enda et nytt felt kalt «Opphav». Siden jeg allerede visste hvilken «Kombiner-verdi» som skiller flatene fra linjene brukte jeg en enkel “Else-If” syntaks i feltkalkulatoren for å angi verdien 0 til de elvene og bekkene med linjeopphav, og verdien 1 til de med flateopphav. Tanken bak dette var at om det skulle bli nødvendig, så skulle det gå raskt å finne ut hvilke elver og bekker som stammer fra hvilke kildedatasett.

```

Pre-Logic Script Code:
If [Kombiner] < 277 Then
result = 0
Else
result = 1
End if
Opphav = result

```

Kartet i figur 3.13 viser hvordan de data som har blitt samlet inn og bearbeidet ser ut visuelt i ArcGIS. Her er det komplette fluviale linjedatasettet visualisert med blå linjer over terrengmodellen som har fargenyanser basert på høyden over havet, med høyeste punkt på om lag 565 meter. Kvikkleiresonene fra NVE er visualisert med en fargeskala som beskriver skredfaregraden de ulike sonene har blitt klassifisert med.



Figur 3.13: Det fluviale datasettet, ferdig konvertert fra flater til linjer, og slått sammen med det de resterende linjene fra FKB, og visualisert over den ferdig interpolerte terrengmodellen.

3.4.3 Terrengkarakterisering av elver og bekker

I det forrige avsnittet ble FKB sine hydrologiske data bearbeidet slik at alle elver og bekker i Trondheim er representert i linjeformat. Det som fantes av informasjon om disse elvene og bekkene, såkalt metadata, har imidlertid gått tapt i bearbeidingsprosessen. Det eneste vi etter denne prosessen vet, er lengden på linjene, som er standard informasjon om linjedata i ArcGIS. Ved hjelp av verktøyet “Add Surface Information” kan vi imidlertid oppdatere linjedatasettet med høydeinformasjon fra terrengmodellen. Det blir beregnet høydeverdier for hvert punkt og knekkpunkt som utgjør linjene, og informasjon om minste, største og gjennomsnittlig hellingsgrad⁴ til hver linje blir lagt til i attributt-tabellen (ESRI 2012b).

Før jeg beregnet variablene som skulle være sammenligningsgrunnlaget i analysen valgte jeg å forutsette at alle elver og bekker som skulle være med i analysen måtte, på ett eller annet punkt bevege seg innenfor en av NVEs kartlagte kvikkleiresoner, ettersom dette er de definerte studieområdene for oppgaven. For å beregne hvilke elver og bekker som er innenfor disse

⁴ Begrepene helling og skråning har i denne oppgaven samme meningsinnhold.

kvikkleiresonene gjorde jeg en sammenslåing av data basert på romlig plassering, og valgte at hver linje blir gitt all informasjon fra flaten som ligger nærmest. Det som skjer da er at to datasett sammenslås basert på hvor de overlapper. Om de to datasettene ikke overlapper vil data fra den i dette tilfelle nærmeste kvikkleiresonen bli tilegnet den aktuelle elven eller bekken. En vil da også få informasjon om hvor langt unna elven eller bekken ligger en kvikkleiresone (ESRI 2012c). Å skille ut elvene og bekkene som ligger innenfor kvikkleiresoner fra de som ikke gjør det, var etter sammenslåingen så enkelt som å slette alle som hadde en distanse til en kvikkleiresone på over 0 meter. Dette reduserte det totale antallet elver og bekker fra 2736 til 325 (se figur 3.17).

En kan jo diskutere om elver og bekker som ligger innenfor en gitt buffersone også burde vært med, men ettersom NVE og NGI påpeker at kvikkleiresonene er et antatt maksimum, kan en anta at områder utenfor disse ikke inneholder kvikkleire og således ikke er like utsatt for skred på bakgrunn av erosjon (Gregersen 2008). Det vil også være vanskelig å angi en bestemt bufferstørrelse uten noe teoretisk grunnlag til å støtte beslutningen på.

For å kunne analysere det fluviale datasettet er det nødvendig å beregne variabler som er sammenlignbare og som kan beskrive noen av karakteristikkene til elvene og bekkene. De fire variablene som er grunnlaget for analysen er forklart i de kommende avsnittene. Elver og bekker er komplekse fluviale systemer (Knighton 1998), og fire variabler vil følgelig ikke kunne gi et helt realistisk bilde av hvordan disse elvene og bekkene er i virkeligheten. De vil imidlertid være et godt utgangspunkt for å demonstrere hvordan en analyse av et stort område kan gjennomføres.

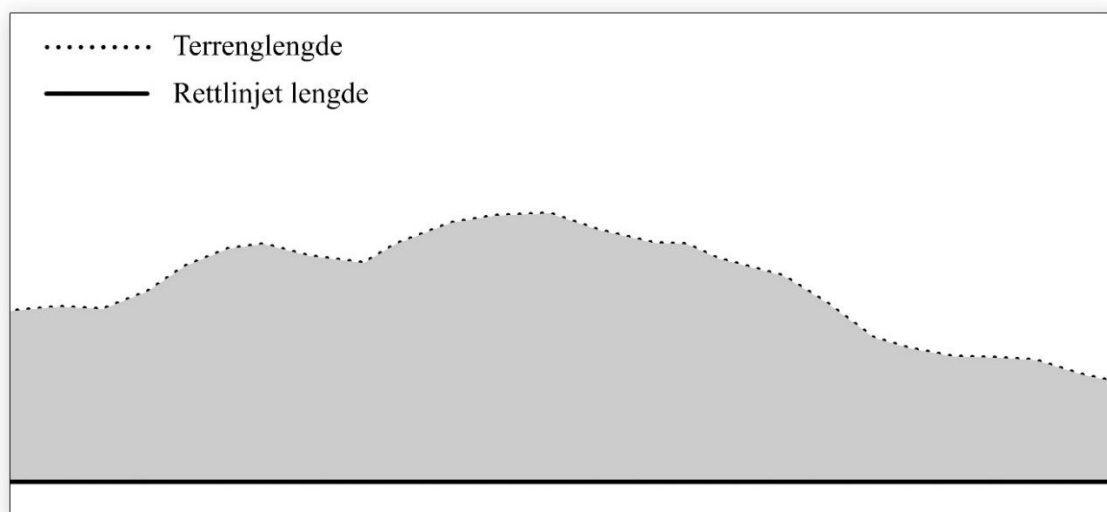
3.4.3.1 Gjennomsnittlig helling / skråning

Helling i denne sammenheng beskriver terrengets bratthet mellom to punkter (Heywood et al. 2006). Akkurat denne variabelen representerer den gjennomsnittlige hellingsgraden elven har fra start til slutt punkt. Verktøyet som brukes for å beregne denne informasjonen bruker en vektet algoritme hvor den gjennomsnittlige skråningen blir kalkulert på bakgrunn av skråningsverdiene til hvert linjesegment (linjen mellom f.eks. to knekkpunkter), hvor de lengste linjesegmentene er vektet høyest (ESRI 2012b). Det beregnes også minimum og maksimumsverdier for hele elve- eller bekkelengden, men det vil være formålstjenlig å bruke den gjennomsnittlige verdien ettersom den eliminerer lokale ekstremverdier på grunnlag av vektingen i favør av lange strekk (ESRI 2012b). Denne variabelen vil gi en god indikasjon på

hvilke elver og bekker som har stor vannhastighet, og derfor stort arbeidspotensiale som gir energioverskudd til å erodere (Sulebak 2007). Variabelen er videre kalt for skråning.

3.4.3.2 Ruhet

Denne variabelen er et mål på hvor kupert eller ulendt terrenget som elvene og bekkene beveger seg i er. En slik variabel er tidligere brukt for å beregne hvor ulendt terrenget er ved grenseoverganger mellom to land (Brochmann et al. 2012), men har også en rekke andre bruksområder, som i denne oppgaven. Variabelen beregnes ved å dele elvenes faktiske lengde basert på terrenngmodellen, som vil være tilnærmet lik den virkelige elvelengden, på elvenes lengde på et flatt plan (figur 3.14). Er verdien 1 vil terrenget være helt flatt, mens en verdi mye over 1 tilsier at terrenget er ulendt. Elver og bekker i bratt og ulendt terreng vil ha større potensiale for å erodere enn de som beveger seg i slakt hellende terreng, spesielt ved økt tilførsel av vann som øker elvens hastighet (Sulebak 2007).



Figur 3.14: Forskjellen mellom terrenglengde og flat lengde.

3.4.3.3 Sinusitet

En linjes sinusitet⁵ kan gi nyttig informasjon for en rekke formål. Det kan for eksempel brukes til å undersøke om buede veier har en større kollisjons-rate enn rette veier (Haynes et al. 2007), eller for å beskrive meanderings-ratioen til elver som i denne oppgaven (Movshovitz-Hadar og Shmukler 2006). For denne oppgaven kan en slik variabel gi en indikasjon på hvilke elver eller bekker som eroderer mer sidelengs i elvebanker, enn andre. Denne variabelen beregnes på samme måte som ruhetsvariabelen, ved at en deler elvens faktiske lengde på den rettlinjede lengden mellom start og slutt punkt. En verdi nær 0 indikerer en svært rett elv eller bekk, mens større verdier indikerer elver og bekker som i mer eller mindre grad meanderer.

En måte å finne den rettlinjede avstanden til alle elvene og bekkene er å bruke et generaliseringsverktøy på en kopi av linjedatasettet. Hvis en bruker en svært høy generaliseringstoleranse vil alle strekkene bli helt rette. Slår en sammen disse to tabellene, kan en beregne sinusiteten til hver elv eller bekk som nevnt over.

Et problem med denne variabelen er at den ikke tar hensyn til hvor ofte elven eller bekken svinger. En lang elv som på midten har én krapp sving kan ha en høyere variabelverdi enn en mer rettlinjert elv med små og hyppige meandere (se figur 3.15). Den neste variabelen tar imidlertid høyde for dette.

3.4.3.4 Knekkpunkt

Som nevnt i forrige avsnitt tar ikke sinusitetvariabelen hensyn til hvor ofte elven eller bekken svinger. Ved å se på hvor mange knekkpunkter hver elv eller bekk består av over en gitt lengde, kan vi imidlertid gi en indikasjon på dette. En vektorbasert linje er som kjent en rett strek mellom to punkter, altså må en buet linje bestå av flere korte linjesegmenter som til sammen utgjør en bue (Longley et al. 2011). En kan da anta at desto flere knekkpunkter den totale elve- eller bekkelengden består av, desto oftere svinger den. For å ta hensyn til at ikke alle elver og bekker er like lange, kan man dele antallet knekkpunkter på elvelengden. Figur 3.15 viser hvorfor denne variabelen er forskjellig fra sinusitetvariabelen.

Denne variabelen representerer antallet knekkpunkter per 10 meter, og beregnes ved å først telle antallet knekkpunkter for alle elvene og bekkene ved hjelp av følgende Python kode:

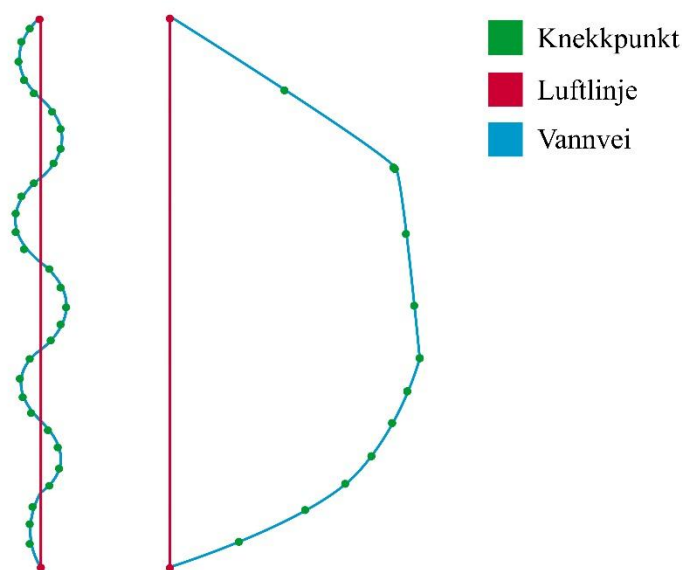
$$VxCount = !shape!.pointcount$$

⁵ Sinusitet defineres her som grad av buethet

For videre å beregne gjennomsnittlig antall knekkpunkter per 10 meter med følgende formel:

$$\text{Knekkpunkt per 10 meter} = \frac{\text{Antall knekkpunkt}}{\text{Lengden på linjen}} \cdot 10$$

Ulempen med denne måten å beskrive svingethet på er at naturlig variasjon i elvedatasettets oppløsning, antallet knekkpunkt brukt for å lage en naturlig sving, vil påvirke variabelen. Elver og bekker med høyere oppløsning vil ha flere knekkpunkter og dermed en høyere variabelverdi enn de med lavere oppløsning.



Figur 3.15: Denne figuren viser hvorfor en elv eller bekk kan ha en høy verdi på variabelen for sinusitet og samtidig en lav verdi på knekkpunktvariabelen, og omvendt. Elven til venstre vil ha et høyt antall knekkpunkt men lav sinusitet. Det motsatte er tilfelle for elven til høyre.

3.4.4 Normalisering av variablene

Fire variabler er nå beregnet for å beskrive noen av elvene og bekkenes karakteristikk. En for gjennomsnittlig skråning, en for gjennomsnittlig ruhet, en for sinusitet, og en for antallet knekkpunkter per 10 meter. Alle er derimot ikke på samme skala. Ruhet og sinusitet har en skala fra 1 og oppover til cirka 2, mens gjennomsnittlig skråning har en skala fra tilnærmet 0 til godt over 300, og knekkpunkt per 10 meter fra om lag 0.5 til 30. Det er selvfølgelig mulig å analysere data slik de er nå, men det vil være lettere å tolke resultatene om de er på en lik skala. Ved å bruke en minimum-maksimum transformasjon kan vi få alle variablene på en felles skala

(Rød et al. 2013). I dette tilfellet på en skala, fra 0 til 1. Dette gjøres ved å opprette et nytt felt i attributt-tabellen for hver variabel og bruker feltkalkulatoren med følgende formel:

$$\text{Ny variabelverdi} = \frac{\text{Original variabelverdi} - \text{Minste verdi}}{\text{Største verdi} - \text{Minste verdi}}$$

For eksempel for gjennomsnittlig skråning er den minste verdien 2,519715, mens den største verdien er 40,61708. Formelen for de nye konverterte verdiene blir da seende slik ut:

$$\text{Ny skråningsverdi} = \frac{\text{Original skråningsverdi} - 2,519715}{40,61708 - 2,519715}$$

Samme metode brukes for alle variablene, og vi ender til slutt opp med fire variabler på en lik skala fra 0 til 1.

3.4.5 Beregning av lengde innenfor faresoner

Siden erosjon er en av de variablene som vektet høyest i NGI og NVE sin metode for klassifisering av skredfaregrad, er det aktuelt å finne ut hvor stor prosentandel av elve- og bekkelengdene som ligger innenfor de forskjellige fareklassifiserte kvikkleiresonene, og hvor stor andel som ligger utenfor disse sonene. I faregrad 3 beskrives erosjon i vassdrag som aktiv, mens de i 2 og 1 beskrives som henholdsvis noe og lite (Gregersen 2008). Hvis en elv eller bekk beveger seg i kvikkleireområder som er klassifisert med faregrad 3 kan en anta at det foregår mer erosjon i disse elvene og bekkene. Dette vil, sammen med de fire andre variablene kunne gi en god indikasjon på hvilke elver og bekker som har størst potensiale for å utløse nye kvikkleireskred.

For å beregne hvor stor prosentandel av et elve- eller bekkefar som beveger seg i eller uten for kvikkleiresonene, kan man bruke et verktøy som beregner hvor mye to objekter overlapper, basert på romlig beliggenhet. Siden kvikkleiresonene er delt inn i tre forskjellige klasser, fra lav til høy skredfaregrad, gjøres dette i tre omganger ved å splitte kvikkleiresonene opp i tre lag, en for hver fareklasse. Videre beregnes det hvor mye de tre fareklassene overlapper med det hydrologiske datasettet. Resultatene kommer i form av en tabell.

Informasjonen fra disse tabellene knyttes så til det hydrologiske datasettet med vanlig tabellkobling. For å unngå såkalte NULL-verdier kan man bruke en enkel Visual Basic syntaks når man overfører data fra den koblede tabellen til det hydrologiske datasettet.

```

Pre-Logic Script Code:
Dim X
if IsNull ([Prosent Faresone 3*]) then
X = 0
else
X = [Prosent Faresone 3*]
end if

```

```

Faresone1/2/3 =
X

```

* Feltet som beskriver hvor mye linjen overlapper med faresone 1, 2 eller 3.

For å beregne hvor stor andel av elvene som ligger utenfor en kvikkleiresone subtraherer man de tre foregående variablene med 100. Om en elv ligger 20% innenfor fareklasse 2 og 10% innenfor fareklasse 3 er naturligvis 70% av lengden til elven helt utenfor kvikkleiresoner. Den resulterende attributt-tabellen blir seende ut slik som i figur 3.16.

Faresone1	Faresone2	Faresone3	Faresone0
0	0	88.705025	11.294975
0	100	0	0
0	0	92.149104	7.850896
0	0	100	0
0	0	87.723212	12.276788
0	100	0	0
0	0	100	0
0	21.042063	0	78.957937
0	0	100	0
0	0	100	0
0	100	0	0
0	0	100	0
0	100	0	0
0	0	13.816633	86.183367
64.769954	0	0	35.230046
0	0	100	0
0	0	100	0

Figur 3.16: Attributt-tabellen med verdier som beskriver prosentandel av lengden på elvene og bekkene som ligger innenfor kvikkleiresoner med fareklasse 1, 2 og 3. Faresone0 indikerer prosentandel som ligger utenfor kvikkleiresoner.

3.5 Oppsummering

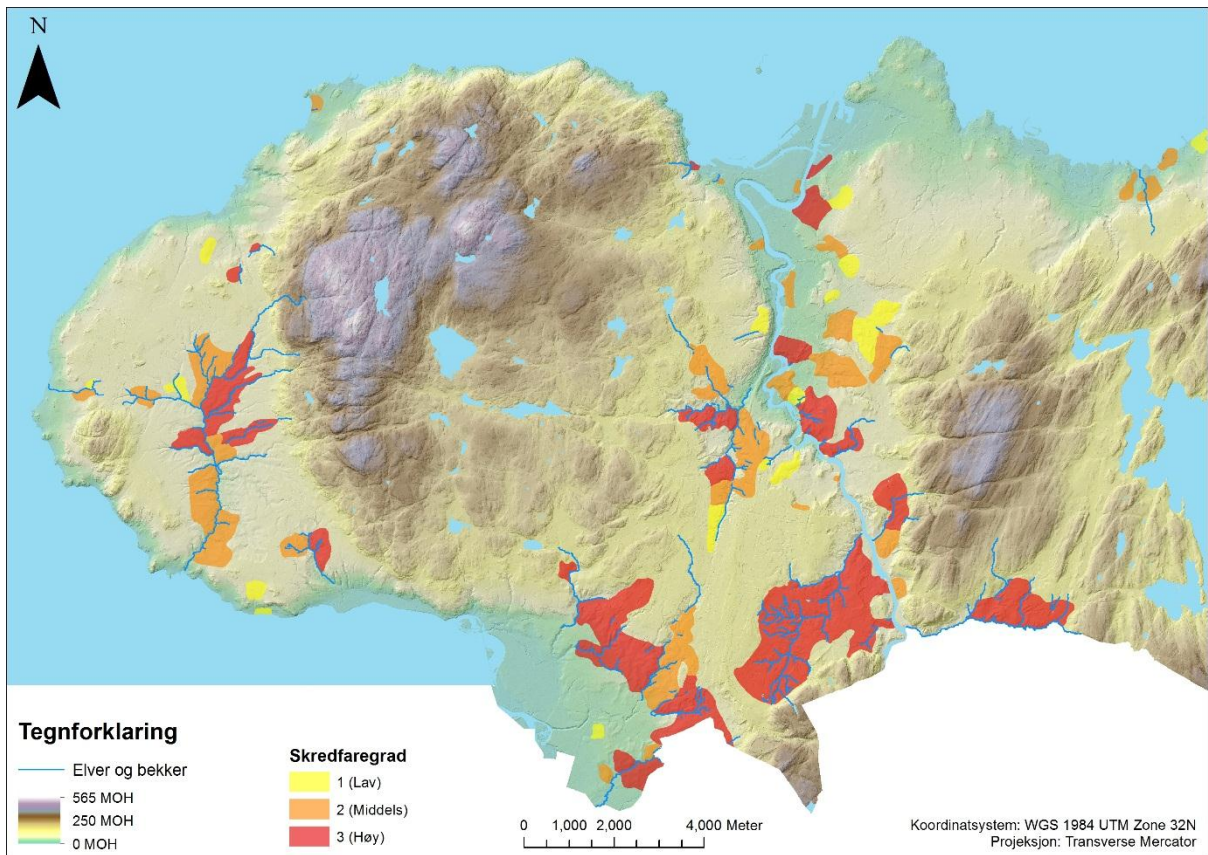
En kort oppsummering er på sin plass etter et så langt kapittel. Bearbeidingen av kilde-data har gjennom flere steg resultert i en rasterbasert terrengmodell med 1 meters romlig oppløsning, og et fluvialt datasett bestående av 325 elver og bekker som ligger innenfor NVEs kartlagte kvikkleiresoner.

Terrengmodellen og det fluviale datasettet har videre blitt brukt som grunnlag for å beregne fire variabler som beskriver noen av karakteristikkene til disse elvene og bekkene. Til slutt er det beregnet hvor stor prosentandel av de totale elve- eller bekkelengden som befinner seg innenfor de tre fareklassene til NVE og NGI. Det finnes i tillegg indekser som beskriver konsekvensklasse og risikoklasse for de samme kvikkleiresonene.

Kartet i figur 3.17 viser terrengmodellen, kvikkleiresonene rangert etter skredfaregrad, og de 325 elvene og bekkene som er gjenstand for videre analyse. Tabell 3.2 inneholder en oversikt over de beregnede variablene og hva verdiene for dem betyr.

Tabell 3.2: En oversikt over de kalkulerede variablene brukt i analysen, og hva verdiene indikerer.

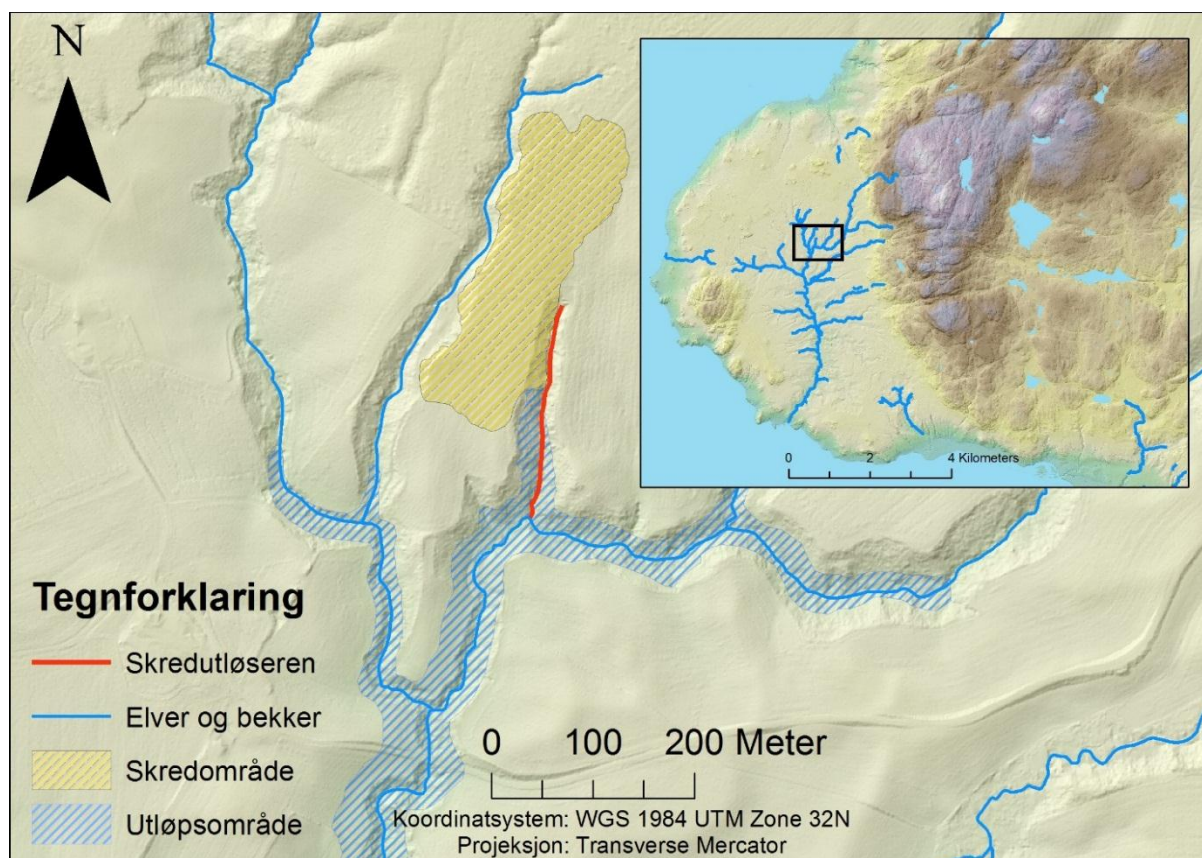
Variabel	0 (lav verdi)	1 (høy verdi)
Skråning	Svak skråning	Bratt skråning
Ruhet	Flatt	Kupert
Sinusitet	Rett	Svingete / Meandrerende
Knekkpunkt	Få	Mange



Figur 3.17: Elver og bekker som beveger seg innenfor en eller flere av NVE og NGIs kvikkleiresoner, klassifisert etter skredfaregrad.

4 Resultater og analyse

Bekken som utløste kvikkleireskredet på Byneset (figur 4.1) har verdier over gjennomsnittet på variablene for skråning og ruhet, og under gjennomsnittet på variablene for sinusitet og knekkpunkt (se tabell 4.1). I tillegg til å få visualisert bekken ovenfra som er standard i ArcGIS og som ganske raskt støtter oppunder sinusitet- og knekkpunktvariablenes indikasjoner om at bekken er relativt rett, går det an å visualisere bekken horisontalt i et såkalt lengdeprofil (figur 4.2). Med dette lengdeprofilet og data fra tabell 4.1 finner vi ut at bekken er relativt jevnt hellende fra start til slutt. Den er cirka 210 meter lang og har et fall på cirka 20 høydemeter, noe som gir den en skråningsgradient på om lag 1:10.

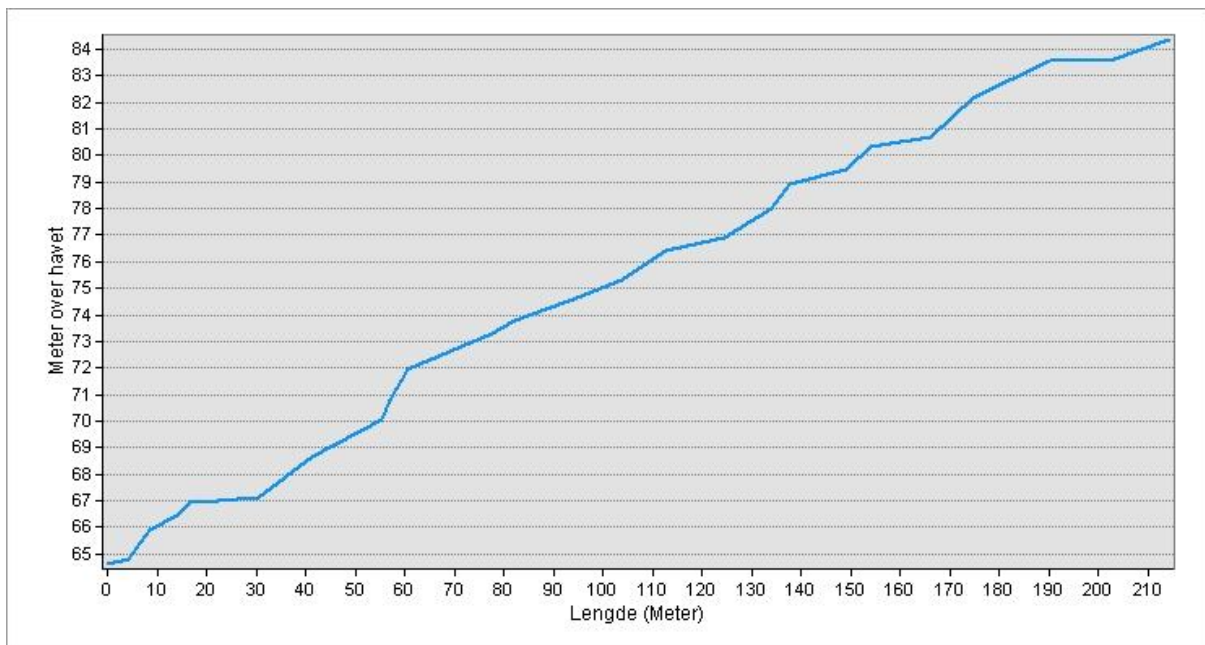


Figur 4.1: Området hvor skredet på Byneset ble utløst, med den utløsende bekken markert med rød farge. Skred- og utløpsområde med henholdsvis gul og blå skravurfarge.

Tabell 4.1: Karakteristikkene til bekken som utløste skredet på Byneset.

Variabel	Verdi (gjennomsnitt for hele datasettet)
Skråning	0.4693 (0.3022)
Ruhet	0.3216 (0.1773)
Sinusitet	0.0146 (0.1237)
Knekkpunkt	0.0250 (0.1808)
Fareklasse (% innenfor 1-3)	100% innenfor fareklasse 2 - Medium
Konsekvens (1-3)	1 - Lav

Tabell 4.1 fungerer videre som en referanse for å evaluere kriteriene til gruppene som er resultatene for de kommende analysene. Sammengrupperte elver og bekker som har lavere variabelverdier, spesielt på skråning og ruhet, vil sees på som mindre sannsynlig for å utløse nye skred.



Figur 4.2: Lengdeprofilen til bekken som utløste skredet på Byneset.

Ettersom det opereres med både kontinuerlige og kategoriske variabler⁶ er det formålstjenlig å dele analysen inn i to steg. Dette er fordi kategoriske variabler ofte vil undergrave de kontinuerlige variablene, slik at resultatene nesten utelukkende blir styrt av de kategoriske

⁶ Kontinuerlige variabler har i motsetning til kategoriske variabler ikke klart definerte steg mellom verdiene (Wade og Sommer 2006). Eksempler på kontinuerlige variabler er høyde og temperatur. Eksempler på kategoriske variabler er kjønn og elvenavn.

variablene. Dette viste seg i de første analysene som ble gjennomført med både de fire variablene som er på en kontinuerlig skala, og de kategoriske indeksene faregrad og konsekvensgrad. Elver og bekker ble da kun gruppert sammen med andre elver og bekker som delte samme faregrad eller konsekvensgrad. Et slikt resultat vil være svært urealistisk, ettersom elver og bekker med lignende karakteristikk naturligvis ikke trenger å befinne seg kun innenfor områder som er klassifisert som f.eks. faregrad 3.

I den første delanalysen ble kun de fire variablene fra kapittel 3.4.3 analysert (figur 4.3-4.7, tabell 4.2-4.5). I den andre delanalysen ble resultatet fra den første delanalysen analysert på nytt med hensyn på faregrad; altså hvor stor prosentandel av elvene og bekkene som befinner seg innenfor de ulike faresonene til NVE og NGI. I tillegg er det gjort like analyser hvor konsekvensgraden til de samme kvikkleiresonene, og gruppetilhørighet fra resultatet i første delanalyse er inkludert (figur 4.11-4.13).

Resultatene fra den andre delanalysen ble videre klassifisert og rangert manuelt, basert på kriteriene til de resulterende gruppene (tabell 4.6-4.7). Grupper hvor elver og bekker har høy verdi på faregrad og konsekvensgrad vil følgelig bli rangert som de «farligste» gruppene, mens gruppene hvor faregrad og konsekvensgrad er lav vil bli rangert som «mindre farlige» grupper. De endelige resultatene er et utvalg elver og bekker som har lignende eller «farligere» karakteristikk i forhold til bekken som utløste skredet på Byneset, rangert etter:

1. Skredfaregrad (figur 4.11).
2. Skredfaregrad og konsekvensgrad (figur 4.12).
3. Skredfaregrad, konsekvensgrad og gruppetilhørighet fra første delanalyse (figur 4.13).

Det er ikke påført noen romlige begrensninger på analysene. Det er ingen grunn til å anta at elver og bekker med lignende karakteristikk må være sammenkoblet eller lokalisert i samme geografiske område. Grupperingen av datasettet skjer med andre ord bare på bakgrunn av variablene som er nevnt ovenfor.

4.1 Første delanalyse: Gruppering av like elver og bekker

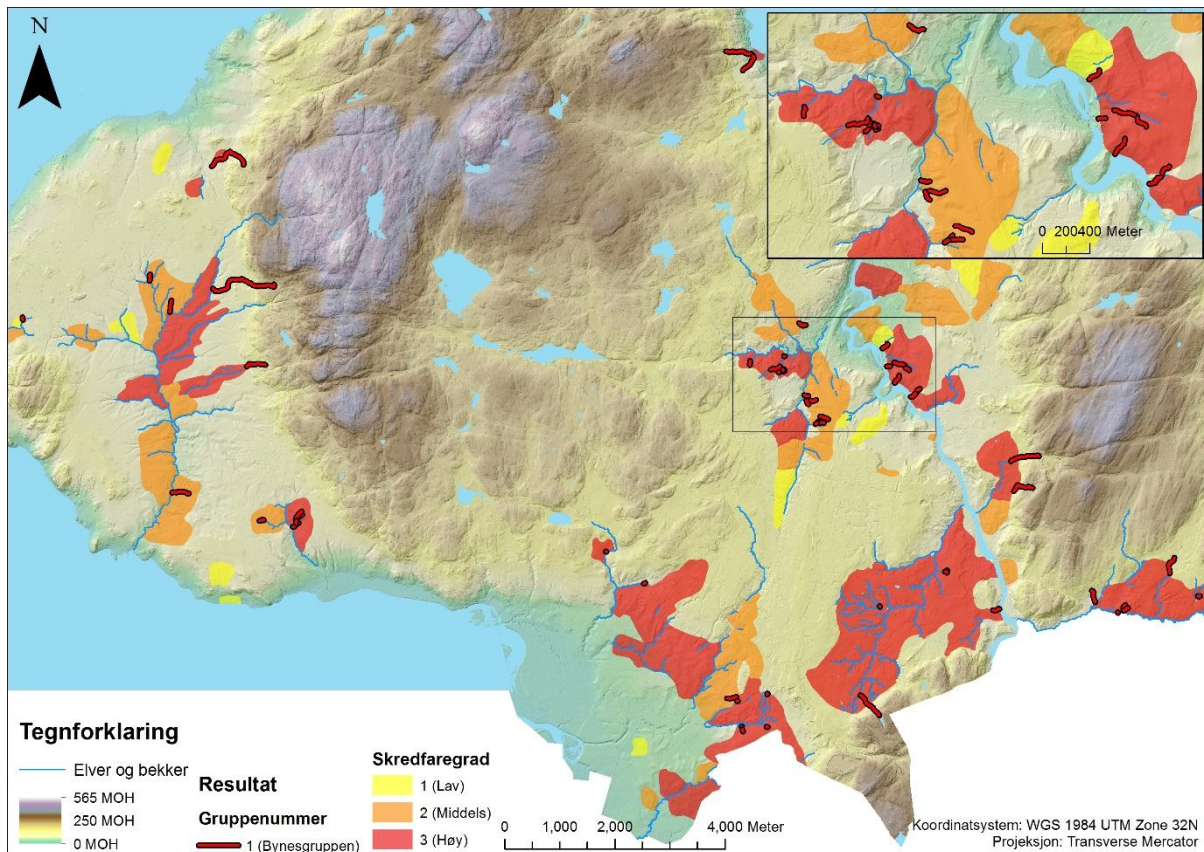
Det har blitt gjennomført om lag 50 analyser med ulike kombinasjoner av gruppe- og variablersammensetning, og med ulike initialmetoder (bekken på Byneset som frø, eller tilfeldig utvalgte frø). I tillegg har noen av analysene blitt etterprøvd i SPSS for å undersøke om verktøy

som bruker samme eller lignende analysealgoritme vil gi de samme resultatene, om de samme kriteriene ligger til grunn.

De kommende figurene og tabellene er resultater fra den første delanalysen som har vært med å påvirke valg av antall grupper, initialmetode, og kriteriene som ligger til grunn for den endelige analysen som fungerer som nytt analysedatasett i den andre delanalysen. Begrunnelse for disse valgene diskuteres i nærmere detalj i kapittel 5.

Selv om resultatene fra analysene i utgangspunktet er for eksempel 3 eller 15 ulike grupper med unike gruppekriterier⁷ og farge på kartet, har de gruppene som ikke inneholder «farlige» elver og bekker blitt utelatt. Grunnen til dette er at 325 objekter og 15 ulike farger gjør kartene vanskelige å lese.

⁷ Gruppekriterier forstås som det intervallet på variabelskalaene en elv eller bekk må ha en verdi innenfor, for at den skal kunne plasseres i en gitt gruppe, jfr. kapittel 2.4.1.



Figur 4.3: Resultat fra Grouping Analysis i ArcGIS (3 grupper, bekken på Byneset som frø). Se også tabell 4.2.

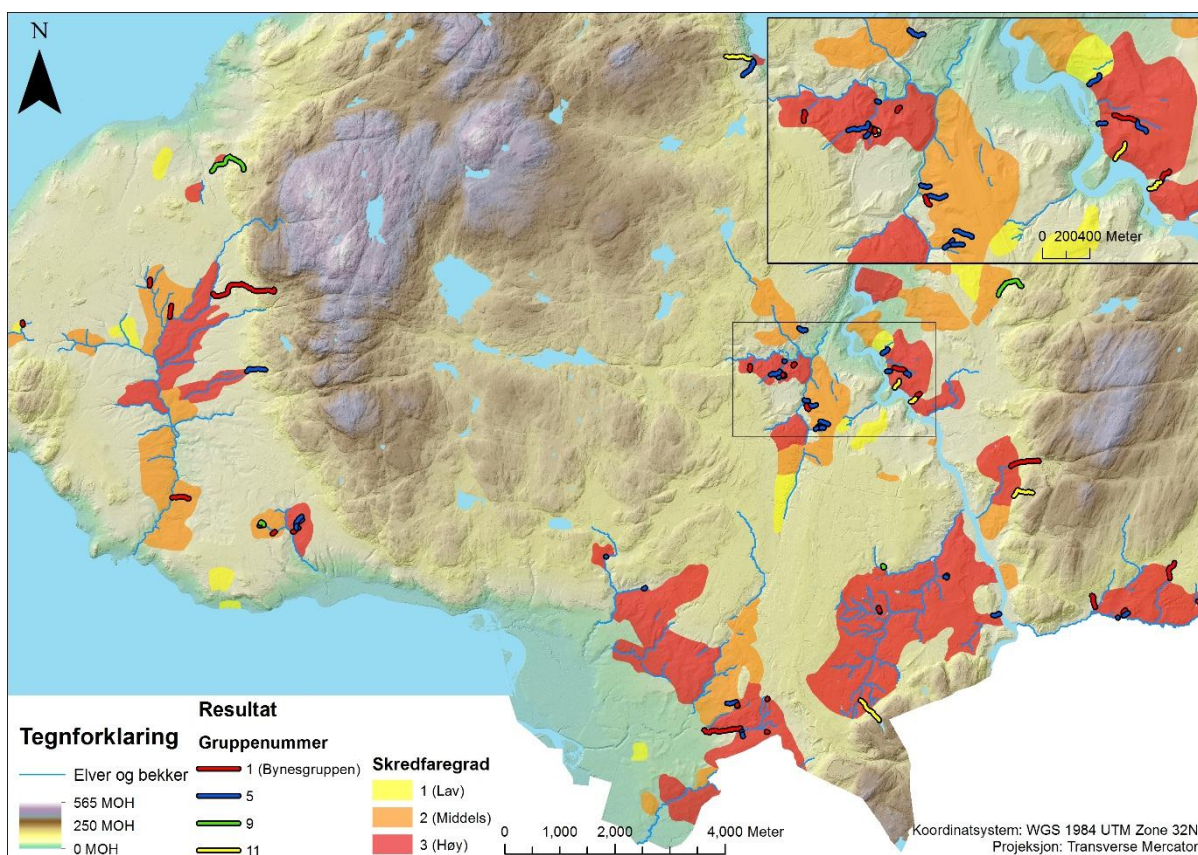
Tabell 4.2: Resultat fra Grouping Analysis (3 grupper, bekken på Byneset som frø. Se figur 4.3).

Gjennomsnittsverdiene for hele datasettet:

Variabel	Gjennomsnittsverdi	Standardavvik	Minste verdi	Største verdi	R ²
Ruhet	0.1773	0.1451	0	1	0.6373
Skråning	0.3022	0.1642	0	1	0.6277
Knekkpunkt	0.1808	0.2193	0	1	0.7822
Sinusitet	0.1237	0.1386	0	1	0.7587

Kriteriene for gruppen til bekken på Byneset (65 valgte elver og bekker):

Variabel	Gjennomsnittsverdi	Standardavvik	Minste verdi	Største verdi	Share
Ruhet	0.4081	0.1445	0.2389	1	0.7611
Skråning	0.5620	0.1228	0.3895	1	0.6105
Knekkpunkt	0.0998	0.0546	0.0251	0.3359	0.3108
Sinusitet	0.0753	0.0797	0.0011	0.4774	0.4763



Figur 4.4: Resultat fra Grouping Analysis i ArcGIS (15 grupper, bekken på Byneset som frø). De ulike fargene på elvene og bekkene indikerer gruppetilhørighet med ulike gruppekriterier. Se også tabell 4.3.

Tabell 4.3: Resultat fra Grouping Analysis (15 grupper, bekken på Byneset som frø. Se figur 4.4).

Gjennomsnittsverdiene for hele datasettet:

Variabel	Gjennomsnittsverdi	Standardavvik	Minste verdi	Største verdi	R ²
Ruhet	0.1773	0.1451	0	1	0.9142
Skråning	0.3022	0.1642	0	1	0.9134
Knekkpunkt	0.1808	0.2193	0	1	0.8992
Sinusitet	0.1237	0.1386	0	1	0.8709

Kriteriene for gruppe 1 (gruppen til Bekken på Byneset. 29 valgte elver og bekker):

Variabel	Gjennomsnittsverdi	Standardavvik	Minste verdi	Største verdi	Share
Ruhet	0.2822	0.0290	0.2211	0.3517	0.1305
Skråning	0.4410	0.0368	0.3722	0.5387	0.1665
Knekkpunkt	0.0999	0.0546	0.0251	0.2991	0.2740
Sinusitet	0.0747	0.0520	0.0055	0.2206	0.2151

Kriteriene for gruppe 5 (32 elver og bekker):

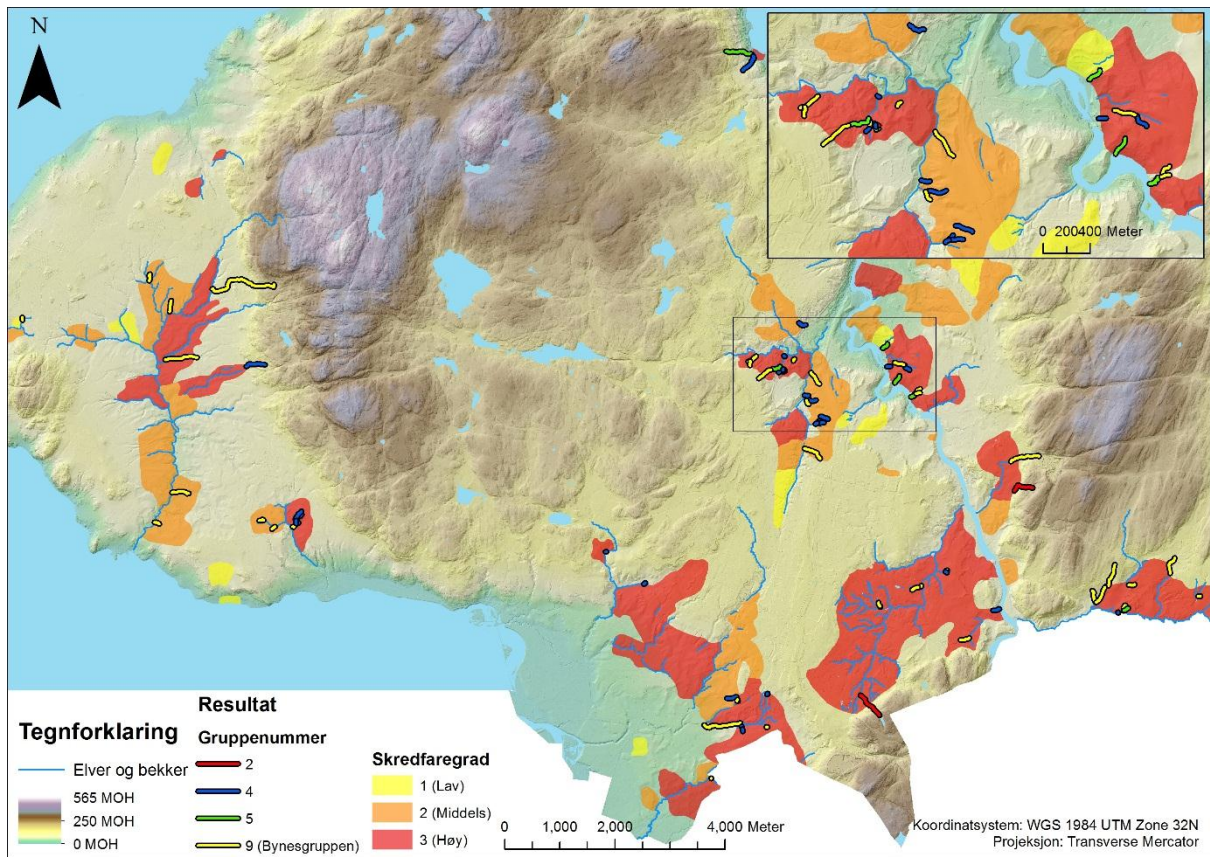
Variabel	Gjennomsnittsverdi	Standardavvik	Minste verdi	Største verdi	Share
Ruhet	0.4230	0.0470	0.3417	0.5405	0.1988
Skråning	0.5861	0.0414	0.5112	0.7005	0.1893
Knekkpunkt	0.1067	0.0576	0.0292	0.3359	0.3067
Sinusitet	0.0584	0.0501	0.0011	0.1676	0.1665

Kriteriene for gruppe 9 (4 elver og bekker):

Variabel	Gjennomsnittsverdi	Standardavvik	Minste verdi	Største verdi	Share
Ruhet	0.2905	0.0318	0.2588	0.3422	0.0834
Skråning	0.4157	0.0363	0.3686	0.4685	0.0999
Knekkpunkt	0.1452	0.0810	0.0372	0.2326	0.1954
Sinusitet	0.4621	0.0532	0.3828	0.5311	0.1483

Kriteriene for gruppe 11 (8 elver og bekker):

Variabel	Gjennomsnittsverdi	Standardavvik	Minste verdi	Største verdi	Share
Ruhet	0.7106	0.1561	0.5646	1	0.4354
Skråning	0.8131	0.0917	0.7413	1	0.2587
Knekkpunkt	0.0885	0.0329	0.0287	0.1560	0.1273
Sinusitet	0.0944	0.1050	0.0031	0.2881	0.2850



Figur 4.5: Resultat fra Grouping Analysis i ArcGIS (15 grupper, frø plukket tilfeldig ut). De ulike fargene på elvene og bekkene indikerer gruppetilhørighet med ulike gruppekriterier. Se også tabell 4.4.

Tabell 4.4: Resultat fra Grouping Analysis (15 grupper, ingen valgte frø. Se figur 4.5).

Gjennomsnittsverdiene for hele datasettet:

Variabel	Gjennomsnittsverdi	Standardavvik	Minste verdi	Største verdi	R ²
Ruhet	0.1773	0.1451	0	1	0.9222
Skråning	0.3022	0.1642	0	1	0.8896
Knekkpunkt	0.1808	0.2193	0	1	0.9203
Sinusitet	0.1237	0.1386	0	1	0.8639

Kriteriene for gruppe 2 (3 elver og bekker):

Variabel	Gjennomsnittsverdi	Standardavvik	Minste verdi	Største verdi	Share
Ruhet	0.9000	0.0784	0.8086	1	0.1914
Skråning	0.8954	0.1042	0.7532	1	0.2468
Knekkpunkt	0.0742	0.0322	0.0287	0.0985	0.0699
Sinusitet	0.1043	0.1041	0.0211	0.2510	0.2299

Kriteriene for gruppe 4 (31 elver og bekker):

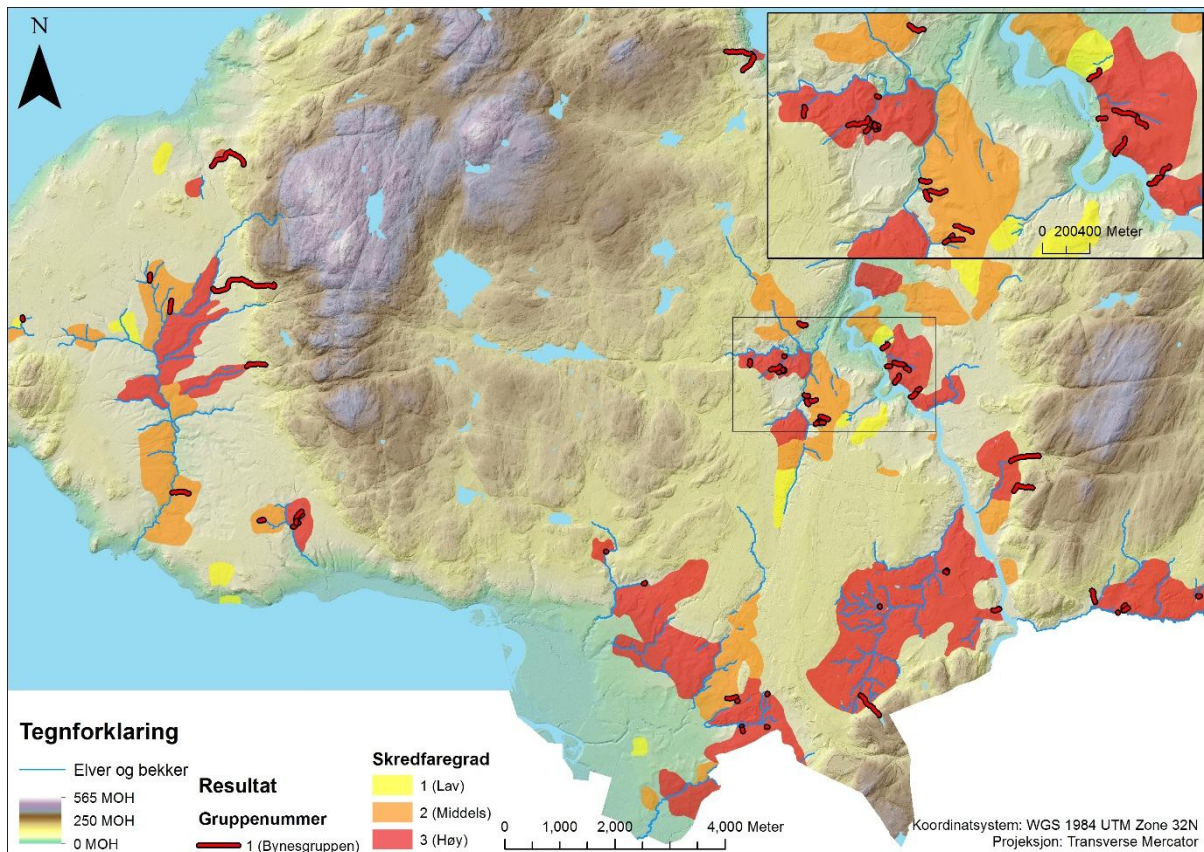
Variabel	Gjennomsnittsverdi	Standardavvik	Minste verdi	Største verdi	Share
Ruhet	0.4012	0.0402	0.2977	0.4612	0.1644
Skråning	0.5697	0.0368	0.4921	0.6544	0.1623
Knekkpunkt	0.1018	0.0409	0.0292	0.2135	0.1842
Sinusitet	0.0524	0.0458	0.0011	0.1676	0.1665

Kriteriene for gruppe 5 (9 elver og bekker):

Variabel	Gjennomsnittsverdi	Standardavvik	Minste verdi	Største verdi	Share
Ruhet	0.5616	0.0469	0.4982	0.6380	0.1398
Skråning	0.7160	0.0584	0.6321	0.7914	0.1595
Knekkpunkt	0.1219	0.0796	0.0704	0.3359	0.2656
Sinusitet	0.0898	0.0868	0.0031	0.2881	0.2850

Kriteriene for gruppe 9 (gruppen til Bekken på Byneset. 42 elver og bekker):

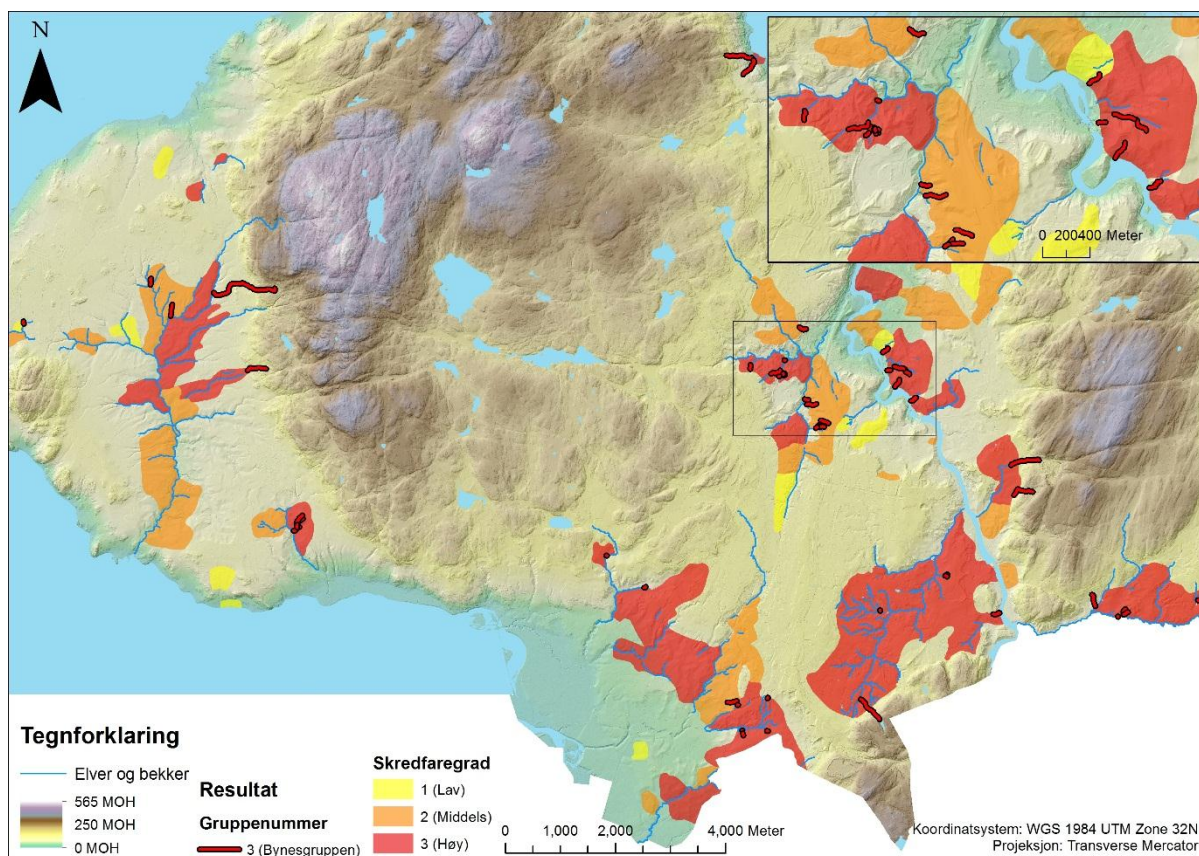
Variabel	Gjennomsnittsverdi	Standardavvik	Minste verdi	Største verdi	Share
Ruhet	0.2503	0.0411	0.1762	0.3217	0.1455
Skråning	0.4075	0.0419	0.3268	0.4861	0.1593
Knekkpunkt	0.1022	0.0563	0.0176	0.2991	0.2815
Sinusitet	0.0684	0.0471	0.0027	0.2206	0.2179



Figur 4.6: Resultat fra K-Means Cluster analyse i SPSS (3 grupper).

Tabell 4.5: Resultat fra SPSS. Gruppeskriteriene for gruppen til bekken på Byneset.

Variabel	Gruppesentrum. K-Means Cluster. Antall elver og bekker: 64	Gruppesentrum. TwoStep Cluster. Antall elver og bekker: 58
Ruhet	0.4100	0.42
Skråning	0.5646	0.58
Knekkpunkt	0.1004	0.10
Sinusitet	0.0738	0.07



Figur 4.7: Resultat fra TwoStep Cluster analyse i SPSS (3 grupper).

4.1.1 Tolking av resultatene fra første delanalyse

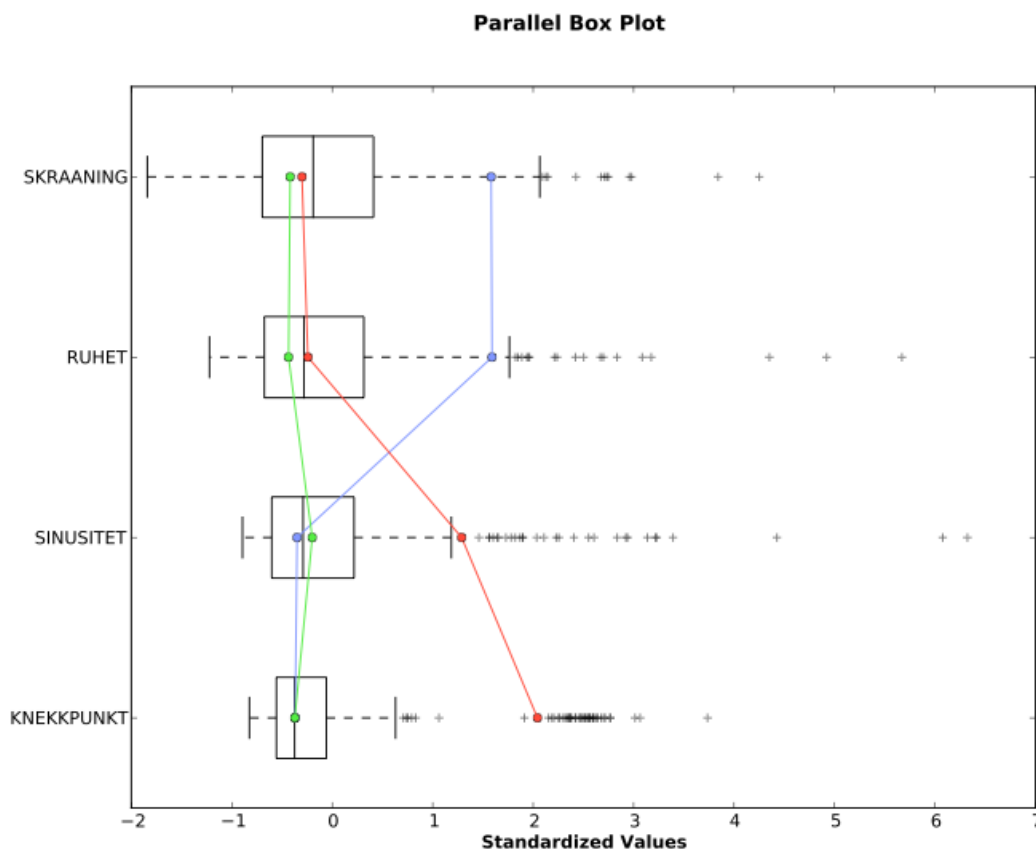
Resultatene som presenteres i de to første figurene (4.3 og 4.4) er de som i hovedsak avgjør hvor mange grupper som brukes i den endelige analysen. Ved å se på figur 4.3 og tabell 4.2 ser vi at i «3-grupper analysen» har bekken på Byneset blitt plassert i den gruppen som omfatter de øverste delene av variabelskalaen for skråning og ruhet, samtidig som den omfatter de gjennomsnittlige verdiene for variablene sinusitet og knekkpunkt. Dette kommer også godt frem i den parallelle boksploot grafen i den tilhørende rapporten (figur 4.8). Ser vi imidlertid på resultatet og rapporten fra «15-grupper analysen» med bekken på Byneset som frø (figur 4.4 og tabell 4.3) finner vi at gruppene 1, 5, 9 og 11 totalt sett har tilnærmet identiske kriterier som gruppen bekken på Byneset ble plassert i, i «3-grupper analysen».

Pseudo F-indeksen indikerer at 3-5 grupper er optimalt når alle fire variablene inkluderes.

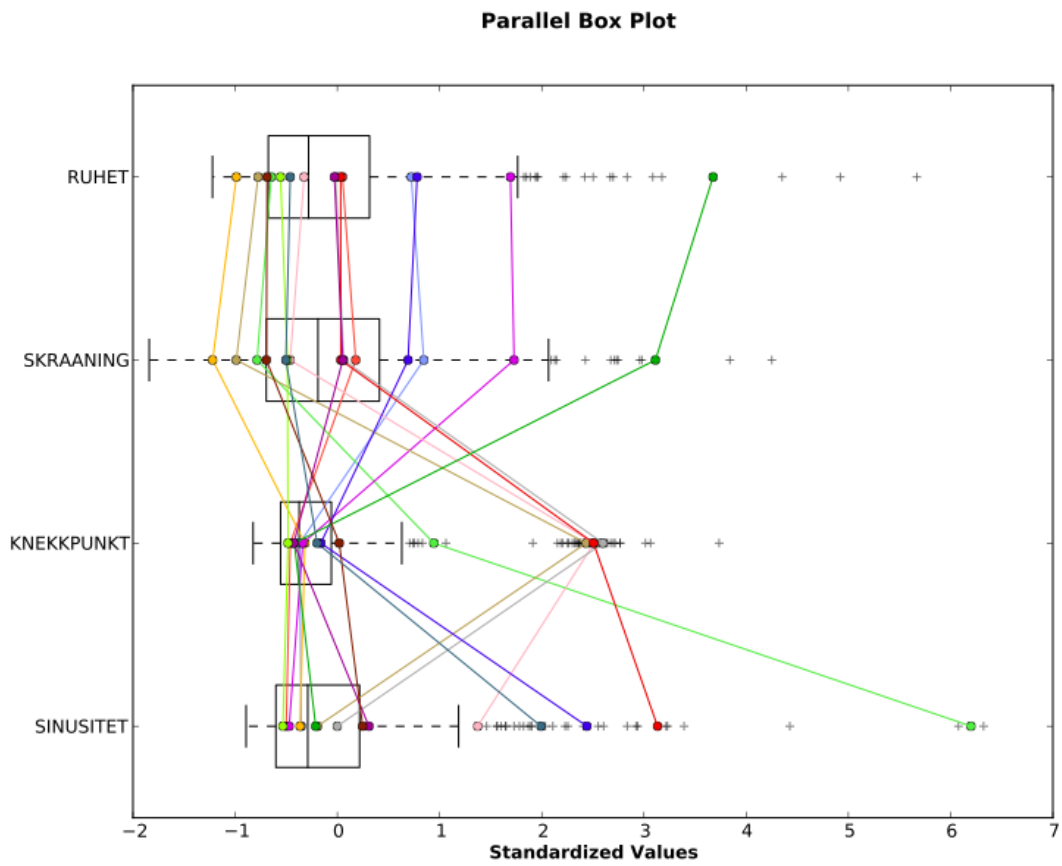
Fordelen med resultatet fra «15-grupper analysen» er at i motsetning til resultatet fra «3-grupper analysen», har man her tilnærmet de samme elvene og bekkene, men også med en naturlig rangert inndeling. Gruppe 1 (i «15-grupper analysen») som bekken på Byneset her er plassert i, har en over gjennomsnittlig høy variabelverdi for skråning og ruhet, og lav

variabelverdi for knekkpunkt og sinusitet, noe som stemmer godt overens med denne bekkens karakteristikk (se tabell 4.1). Gruppene 5 og 11 har tilnærmet lik verdi for variablene knekkpunkt og sinusitet, men høyere verdier for skråning og ruhet. I motsetning har gruppe 9 nesten identiske verdier for skråning og ruhet som gruppe 1, men over gjennomsnittlig verdi på variablene sinusitet og knekkpunkt. Totalt sett gir disse fire gruppene god bredde i resultatet som skal fungere som grunnlag for den andre delanalysen.

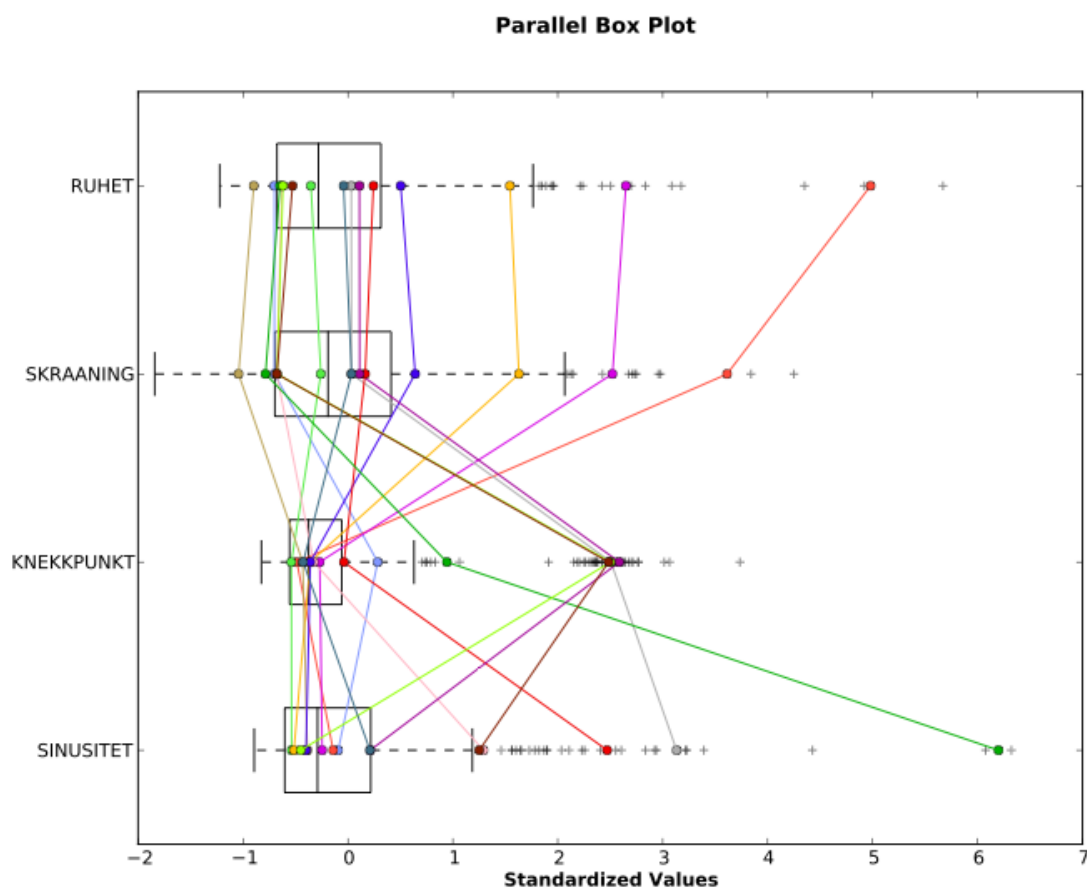
Resultatet fra analysen med 15 grupper og tilfeldig utplukk av frø som initialmetode (figur 4.5) er heller ikke fundamentalt forskjellig fra analyseresultatet med bekken på Byneset som frø (figur 4.4). For å få den samme naturlige rangering måtte man imidlertid her ha brukt 5 grupper. Dette gjør at det inkluderes flere elver og bekker som har «mindre farlige» karakteristikk i forhold til bekken på Byneset, og at det totale antallet elver og bekker som blir plukket ut stiger fra 73 til 84. Figur 4.9 og 4.10 illustrerer dette.



Figur 4.8: Parallell boksploot som viser gjennomsnittsverdien på hver variabel for hver gruppe. (fra rapporten til Grouping Analysis i ArcGIS, med 3 grupper og bekken på Byneset som frø). Gruppen til bekken på Byneset er her representert med blå farge.



Figur 4.9: Parallell boksplot som viser gjennomsnittsverdien på hver variabel for hver gruppe (fra rapporten til Grouping Analysis i ArcGIS, med 15 grupper og bekken på Byneset som frø). Gruppen til bekken på Byneset er her representert med lys blå farge. Gruppe 5, 9 og 11 med henholdsvis lilla, mørk blå og grønn farge.



Figur 4.10: Parallell bokplot som viser gjennomsnittsverdien på hver variabel for hver gruppe (fra rapporten til Grouping Analysis i ArcGIS, med 15 grupper og tilfeldig utplukk av frø). Gruppen til bekken på Byneset her representert med mørk blå farge. Gruppe 2,4 og 5 med henholdsvis rød, gul og lilla farge.

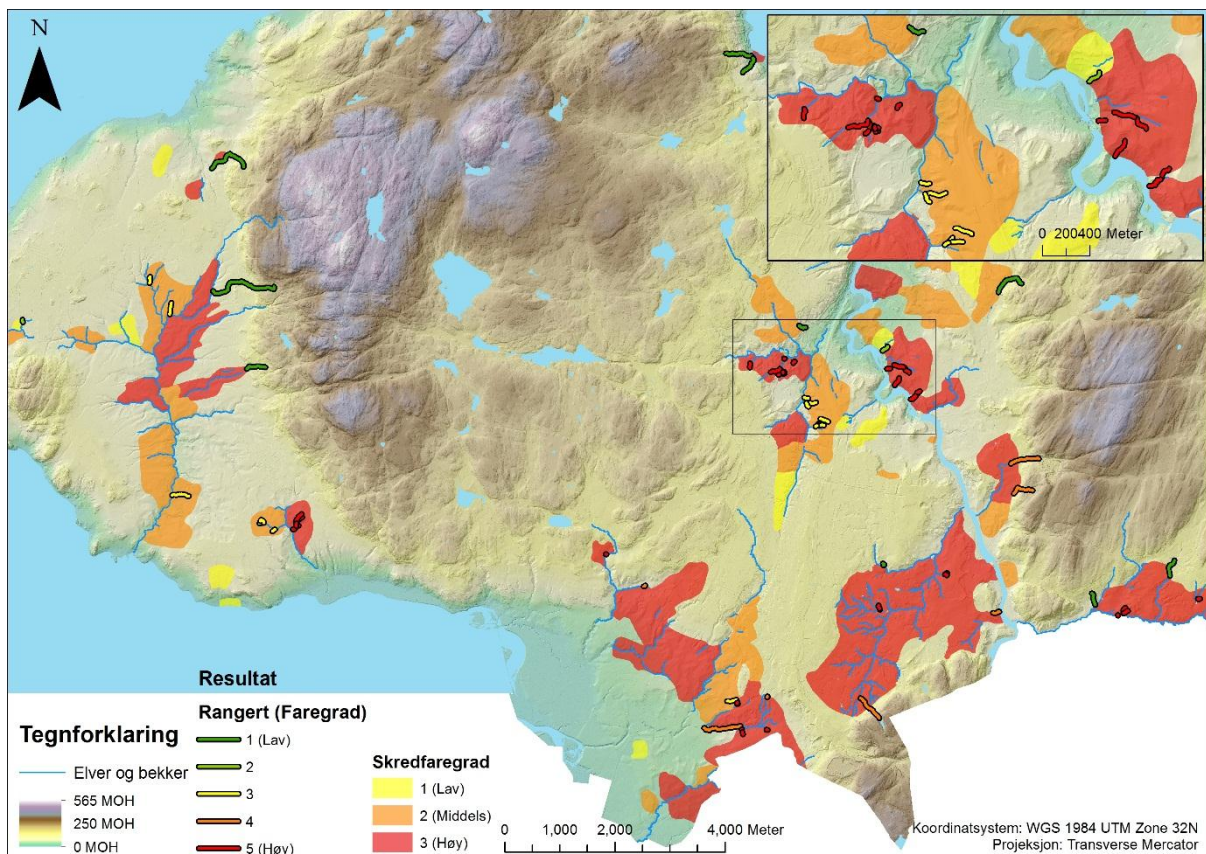
Resultatene fra SPSS analysene er ikke like detaljerte i beskrivelsen av gruppekriteriene som Grouping Analysis i ArcGIS, men som en ser i figur 4.3, 4.6 og 4.7 er resultatet til «3-grupper analysen» i ArcGIS med bekken på Byneset som frø tilnærmet identisk med gruppen som bekken på Byneset ble plassert i, i resultatet fra K-Means Cluster i SPSS (figur 4.6), med unntak av én elv eller bekk. Resultatet fra TwoStep Cluster i SPSS (figur 4.7) er også svært likt resultatet fra ArcGIS med unntak av færre sammengrupperte elver og bekker i gruppen som bekken på Byneset ble plassert i.

4.2 Andre delanalyse: Rangering av skredfarlige elver og bekker

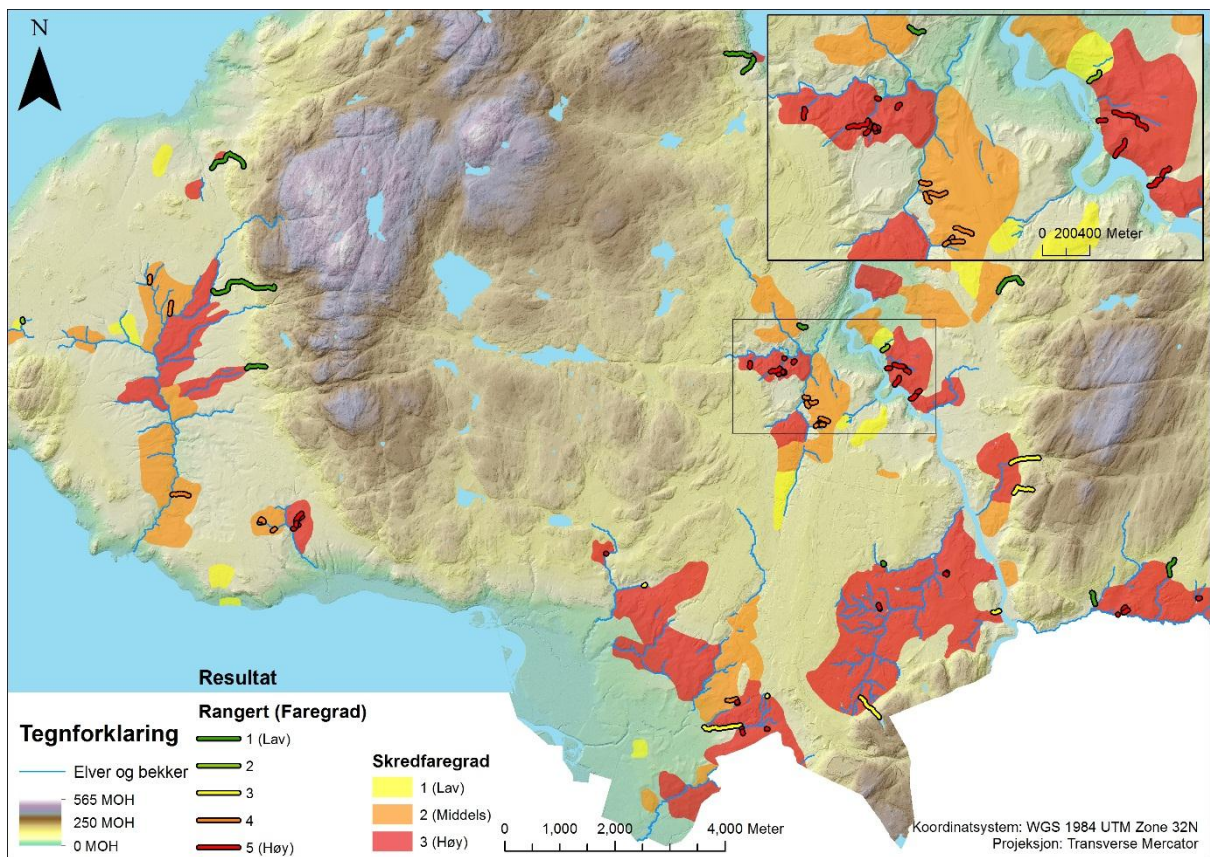
Denne andre delanalysen gjennomføres i stor grad likt som den forrige, med unntak av initialmetode og antall grupper. Her defineres ingen elver eller bekker som frø, og initialmetoden vil således være at alle frø blir valgt ut tilfeldig (se kapittel 2.4.1 for nærmere

beskrivelse). Datagrunnlaget for analysene her vil være de fire utvalgte gruppene fra den første delanalysen, som til sammen omfatter 73 elver og bekker (figur 4.4 og tabell 4.3).

De kommende figurene og tabellene er resultatene fra analysene med indeksene for skredfaregrad, konsekvensgrad og hvilken av de fire gruppene fra den første delanalysen de ble plassert i. Som nevnt innledningsvis i dette kapittelet, vil analysen gjennomføres tre ganger, hvor det hver gang legges til en av de nevnte variablene. I første omgang analyseres elvene og bekkene med hensyn på faregrad (figur 4.11 og tabell 4.6), videre med faregrad og konsekvensgrad (figur 4.12 og tabell 4.6), og til slutt faregrad, konsekvensgrad og gruppetilhørighet fra den første delanalysen (figur 4.13 og tabell 4.7). I de to første analysene er det brukt fem grupper til å fordele datasettet, mens det i den siste er brukt 14. Disse 14 gruppene har så blitt sammenslått til 5 i den manuelle rangeringsprosessen.



Figur 4.11: Resultat fra Grouping Analysis i ArcGIS (prosentandel innenfor faresone)



Figur 4.12: Resultat fra Grouping Analysis i ArcGIS (prosentandel innenfor faresone og konsekvensgrad)

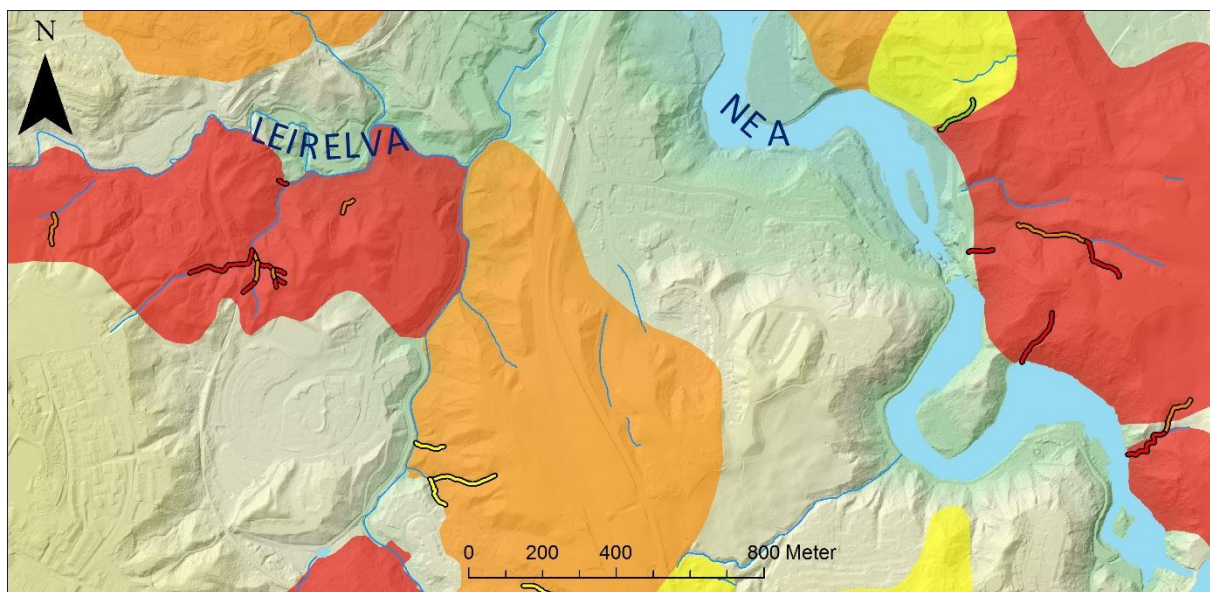
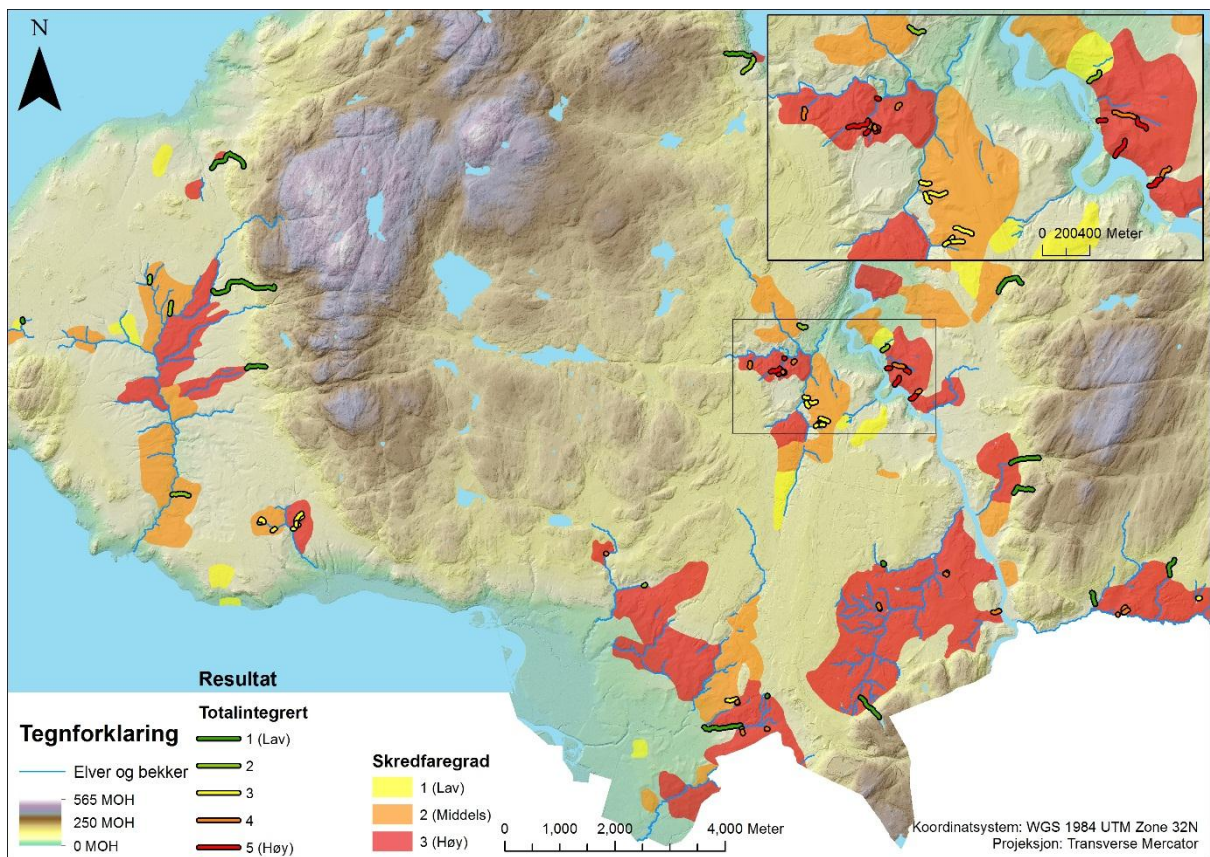
Tabell 4.6: Klassifiseringskriterier for resultatene i figur 4.11 og 4.12. Prosentandel angir hvor stor prosent av den totale elve- eller bekkelengden som ligger innenfor de respektive faresonene (gjennomsnittlig verdi for de sammengrupperte elvene og bekkene).

Rangeringskriteriene med hensyn på faresone (figur 4.11):

Klasse	% utenfor faresone	% faresone 1	% faresone 2	% faresone 3
1	88%	0%	6%	6%
2	0%	86%	6%	14%
3	56%	0%	0%	44%
4	1%	0%	99%	0%
5	1%	0%	0%	99%

Rangeringskriteriene med hensyn på faresone og konsekvens (figur 4.12):

Klasse	% utenfor faresone	% faresone 1	% faresone 2	% faresone 3	Konsekvens 1-3
1	0%	86%	0%	14%	2 (1-3)
2	77%	0%	4%	18%	2.3 (1-3)
3	3%	0%	0%	97%	1.7 (1-2)
4	1%	0%	99%	0%	2.5 (1-3)
5	6%	0%	0%	94%	3

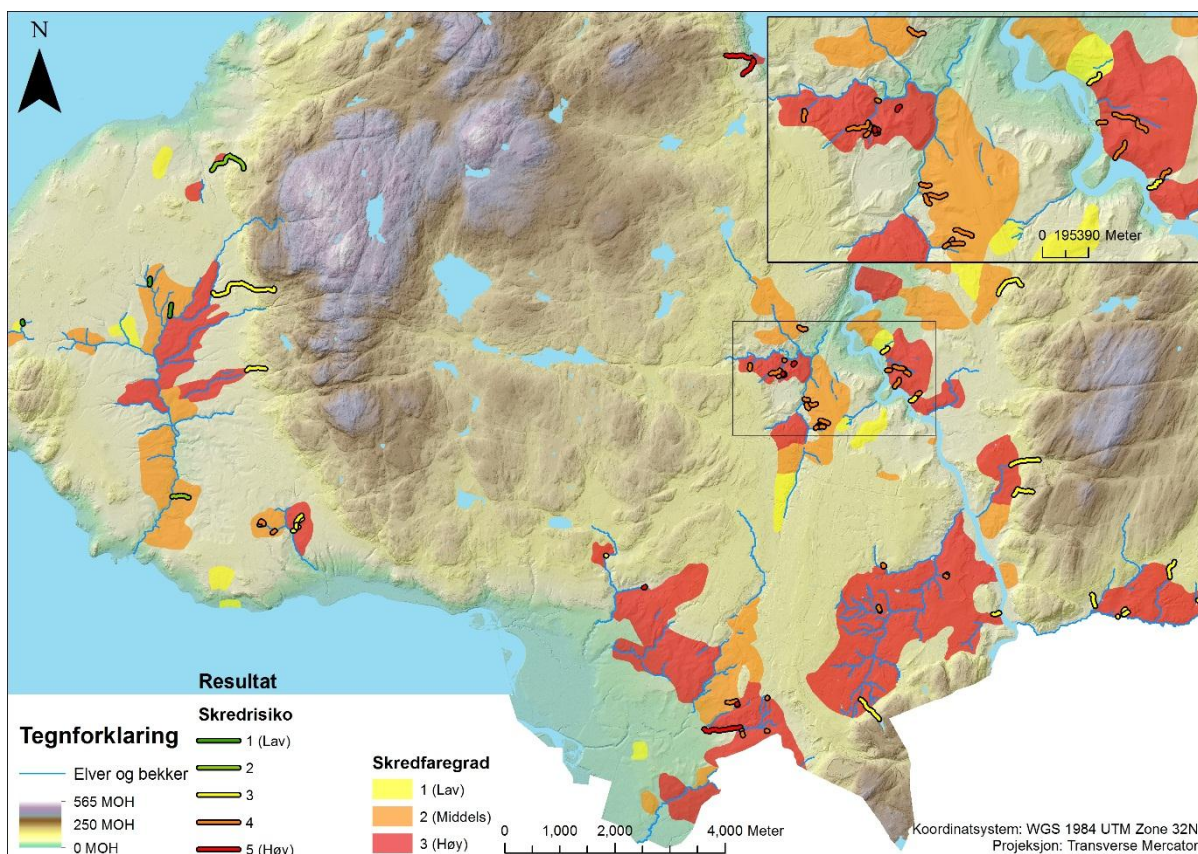


Figur 4.13: Resultat fra Grouping Analysis i ArcGIS (prosentandel innenfor faresone, konsekvensgrad, og gruppetilhørighet fra delanalyse 1). NEA er en forkortelse for Nidelven.

Tabell 4.7: Klassifisering av resultatene i figur 4.13. Prosentandel angir hvor stor prosent av den totale elve- eller bekkelengden som ligger innenfor de respektive faresonene (gjennomsnittlig verdi for de sammengrupperte elvene og bekkene).

Klasse (gruppenr.)	Utenfor faresone	Fares. 1	Fares. 2	Fares. 3	Konsek.	Gruppetilhørighet fra første delanalyse	Antall
1 (3)	0%	100%	0%	0%	1	1	1
1 (13)	80%	0%	0%	20%	2.1 (2-3)	1.5 (1-5)	7
1 (11)	79%	0%	3%	18%	1.8 (1-3)	10 (9-11)	6
2 (4)	63%	0%	14%	23%	3	5	3
2 (8)	0%	0%	100%	0%	1	1	3
2 (9)	0%	71%	0%	29%	3	5	1
3 (14)	6%	0%	94%	0%	3	1	3
3 (12)	0%	0%	100%	0%	3	5.5 (5-9)	8
3 (6)	1%	0%	0%	99%	1	3.6 (1-5)	6
4 (1)	2%	0%	0%	98%	2	1	6
4 (7)	4%	0%	0%	96%	2	5	9
4 (10)	3%	0%	0%	97%	3	1	8
5 (5)	6%	0%	0%	94%	3	5	7
5 (2)	2%	0%	0%	98%	2.8 (2-3)	11	5

Figur 4.14 viser de samme 73 elvene og bekkene rangert etter NVE og NGI sin klassifisering av kvikkleiresonene for skredrisiko. Dette fungerer som et sammenligningsgrunnlag for de tre andre resultatene i denne delanalysen, og blir nærmere diskutert i kapittel 5.



Figur 4.14: Resultatet fra delanalyse 1, rangert etter NVE og NGI klassifisering av kvikkleiresonene for skredrisiko.

4.2.1 Tolking av resultater fra andre delanalyse

Som det kommer frem av resultatene i den andre analysedelen er det ingen fundamentale endringer i resultatet fra analysen med kun variabelen for faregrad (figur 4.11), i forhold til de to andre analysene med henholdsvis faregrad og konsekvensgrad (figur 4.12), og faregrad, konsekvensgrad og gruppetilhørighet fra første delanalyse (figur 4.13). Det er i all hovedsak i det innrammede området rett nord for Tiller og Heimdal, som nærmere vist oppe til høyre i figurene, vi finner de elvene og bekkene som jevnt over har høye verdier på alle variablene. Parallelt med kvikkleiresonene hvor flestparten av elvene og bekkene som har blitt klassifisert som «farligst» renner Leirelva (se figur 4.13).

Også disse analysene ble gjennomført med like kriterier i SPSS. Resultatene fra SPSS viste at med unntak av et par elver og bekker som ble plassert i andre nærliggende grupper, ble resultatet etter manuell klassifisering identisk med resultatet fra Grouping Analysis i ArcGIS. Pseudo F-indeksen antok for den siste analysen med alle fire variablene inkluderer, at 14 grupper

var det optimale antallet grupper. Disse 14 gruppene ble som nevnt sammenslått til 5, etter manuell rangering (tabell 4.7), for å gjøre resultatet mest mulig lesbart på kartet i figur 4.13.

Resultatene fra analysene mine er noe annerledes enn om elvene og bekkene rangeres etter NVE og NGIs klassifisering av kvikkleiresonene for skredrisiko (figur 4.14). Grunner for dette diskuteres i kapittel 5.

5 Diskusjon

I denne oppgaven har jeg undersøkt om og hvordan det er mulig å gjennomføre en analyse av et større område i et GIS, som identifiserer de elvene og bekkene som har størst sannsynlighet for å utløse fremtidige kvikkleireskred, i Trondheim. Jeg har brukt data fra kvikkleireskredet på Byneset i 2012 som utgangspunkt for analysen. Jeg vil i dette kapittelet diskutere datagrunnlaget, metodikken, analysen og resultatene for å besvare problemstillingene som ble definert innledningsvis i oppgaven.

5.1 Evaluering av datagrunnlag og analysevariabler

Kvaliteten på datagrunnlaget spiller naturligvis en avgjørende rolle i analyseprosessen, og feilkilder i datagrunnlaget vil kunne reflekteres i resultatene. I datasettet som er brukt i denne oppgaven er det i hovedsak to potensielt store feilkilder. Den ene er feil knyttet til terrengmodellen mens den andre er feil knyttet til linjedatasettet. Som det kommer frem i kapittel 3.4 som omhandler bearbeiding av datagrunnlaget, er det i all hovedsak det fluviale datasettet som har vært gjenstand for bearbeiding, både ved hjelp av automatiserte prosesser og manuell redigering. I motsetning til ELVIS (NVE 2009), er ikke hovedformålet med det fluviale datasettet i FKB analysing, men heller kartvisualisering (Statens Kartverk 2013b). For å bruke det fluviale datasettet i FKB i denne analysen, måtte mange objekter konverteres fra flater til linjer (se kapittel 3.4.2). Spørsmålet er da om denne konverteringen har påvirket kvaliteten på datasettet og videre variablene brukt i analysene.

For å beskrive noen av karakteristikkene til alle elvene og bekkene opprettet jeg fire variabler som var enkle å beregne ut fra de data jeg hadde. I tillegg har jeg brukt indekser som NVE og NGI allerede har utarbeidet (Gregersen 2008). De variablene som jeg selv har opprettet er alle basert på veldig generelle geomorfologiske og fluvialgeomorfologiske karakteristikk, som skråning og sinusitet, som er karakteristikk som ofte brukes som variabler i klassifisering av elver og bekker (Kondolf et al. 2003). Jeg har i denne oppgaven antatt at erosjonen i vassdrag øker i takt med skråningsgradienten og således skråningsvariabelen, noe som støttes av flere kilder (Sulebak 2007; Mitsova et al. 1996). Samtidig har jeg også antatt at en høy sinusitet indikerer at de aktuelle elvene og bekkene har en økt erosjonsevne i forhold til rette strekk (med lav skråningsgradient).

I realiteten er det mange andre faktorer som spiller inn (Kondolf et al. 2003), og det er for eksempel gjort forsøk på å modellere erosjonsevne i GIS (Mitsova et al. 1996). Erosjon i leire

er imidlertid svært komplekst ettersom det er betinget den kohesive effekten mellom partiklene (Knighton 1998). Det er også utenfor denne oppgavens hensikt å studere kohesjon i kvikkleire, og jeg har derfor valgt å forholde meg til enkle parametere som kan beregnes ut fra datagrunnlaget jeg har til rådighet, og uten komplisert erosjonsmodellering. Erosjon i vassdrag er i tillegg en grunnleggende faktor i NVE og NGIs fareklassifisering av kvikkleiresoner, jfr. tabell 3.1. I områder som er klassifisert med faregrad 3 foregår det ifølge NVE og NGI aktiv erosjon, noe som skulle tilsi at en kan anta at det pågår erosjon i elver og bekker innenfor disse sonene (Gregersen 2008).

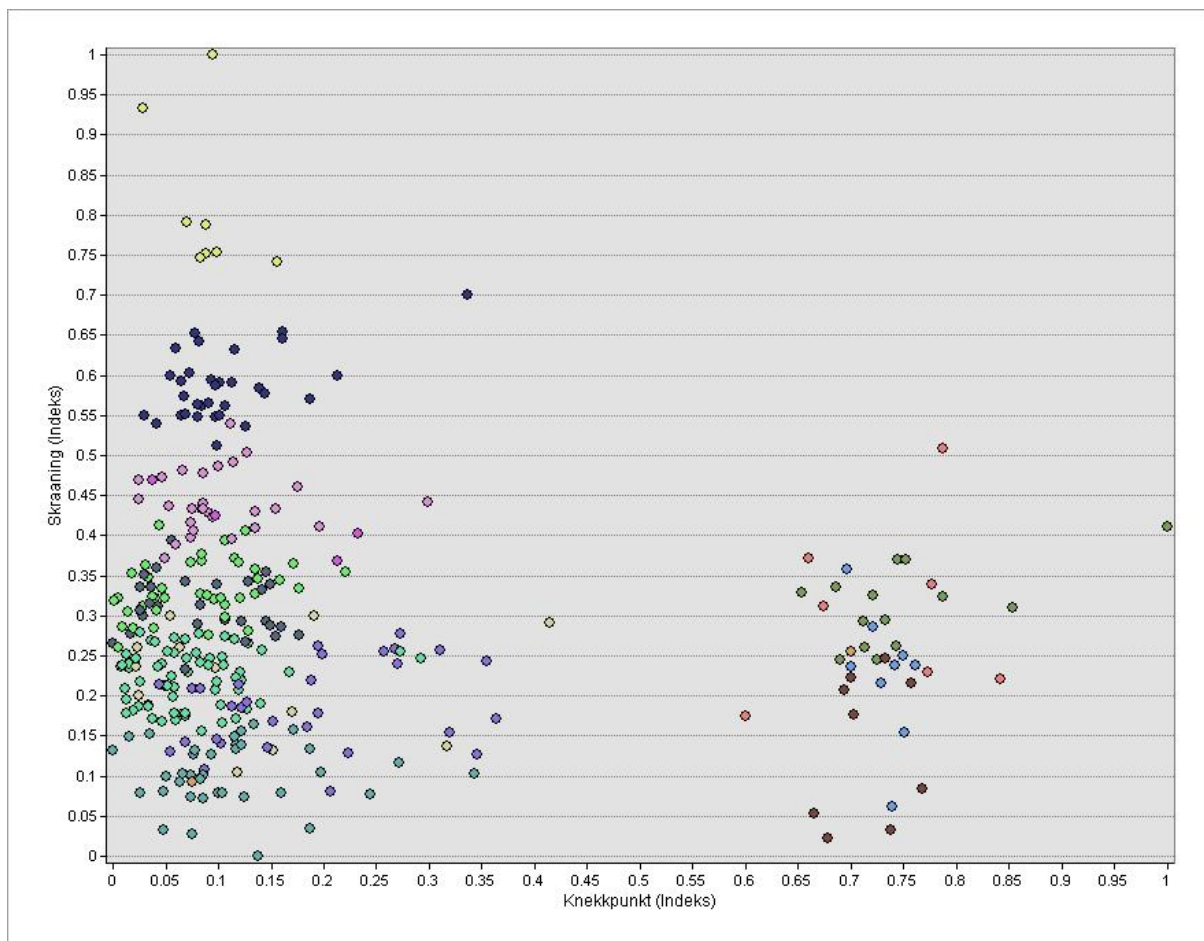
5.1.1 Feilkilder knyttet til det fluviale datasettet

Alle disse variablene er sårbare for feilkilder i større eller mindre grad, men spesielt skråning og antall knekkpunkt er utsatt. En feilkilde kan for eksempel være om linjedatasettet er av mye lavere oppløsning enn terrengmodellen, som jo er grunnlaget for kalkuleringen av høydeverdiene. Linjedatasettet vil da kunne få kalkulert helt feil høydeverdier, om linjene beveger seg annerledes enn det terrengmodellen skulle tilsi. Dette er som nevnt i kapittel 3.3.2 hovedgrunnen til at jeg evaluerte det fluviale datasettet ELVIS som ikke brukbart, illustrert i figur 3.1. Ettersom det fluviale datasettet i FKB har en relativt høy oppløsning (Statens Kartverk 2013b), er det vanskelig å evaluere om slike feil også eksisterer i dette datasettet. Ved manuell inspeksjon virker det imidlertid ikke å være noen grove feil knyttet til dette i det endelige linjedatasettet. Ettersom verktøyet som beregner gjennomsnittlig skråning benytter en vektet algoritme, i favør til lange strekk, vil slike feil også minimeres for skråningsvariabelen (ESRI 2012b). Ruhetsvariabelen vil imidlertid kunne påvirkes.

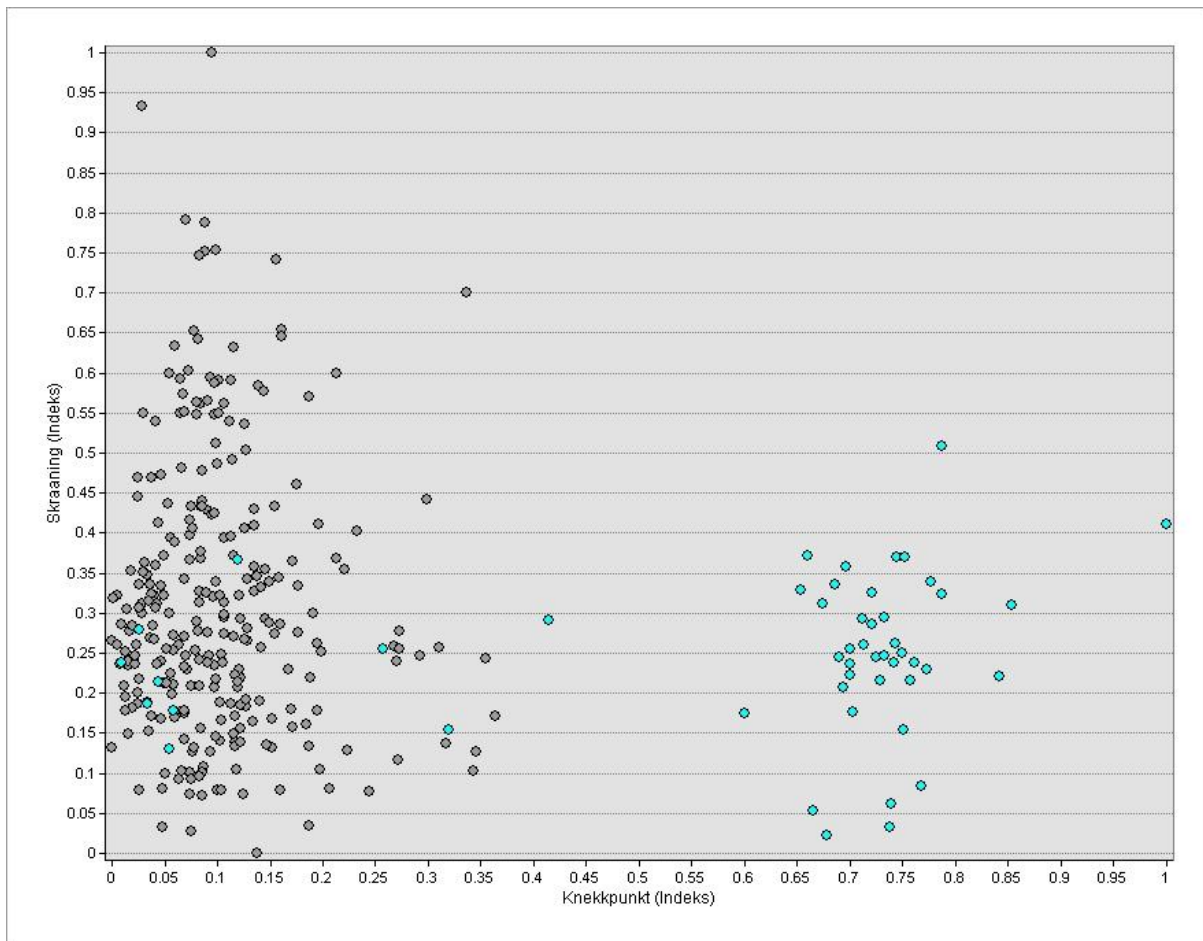
Det var ikke før bearbeidingen av datasettet var antatt ferdig, og de første analysene var gjennomført, at jeg fant ut at det fluviale datasettet inneholdt en feil som stammer fra bearbeidingen, som i stor grad påvirker knekkpunktvariabelen. Dette kommer klart frem i de parallelle boksplot grafene (figur 4.8-4.10), at elvene og bekkene i det fluviale datasettet er delt opp i to klynger med tanke på antall knekkpunkter per 10 meter, brukt for å representere vannveiene. Dette kan illustreres bedre ved å visualisere denne variabelen sammen med en annen, for eksempel i et spredningsplot. Figur 5.1 viser forholdet mellom knekkpunkt og skråningsvariabelen. Hver farge representerer en av gruppene fra «15-grupper analysen» i første delanalysen, og hvert punkt representerer én elv eller bekk. Som en ser er det et klart skille mellom elver og bekker som har en verdi fra 0 til 0.4 og de som har en høyere verdi fra

0.6 og opp til 1. Ikke uventet er dette en effekt av konverteringen av flatene i FKB til linjer. Dette kan man konstatere ved å velge de elvene og bekkene med opphavsverdi 1, som identifiserer elver og bekker som har opphav fra flatedatasettet (se kapittel 3.4.2), og lage et nytt spredningsplot med disse uthevet (figur 5.2). Som en kan se er det utelukkende elver og bekker fra flatedatasettet som befinner seg i denne klyngen, til tross for at noen også befinner seg i klyngen med lavere verdier.

Spredningsplotet i figur 5.1 viser også at elvene og bekkene har blitt gruppert jevnt ut over hele skråningsvariabelen i mer eller mindre distinkte grupper, i motsetning til knekkpunktvariabelen hvor det heller er enten eller om en elv eller bekk befinner seg i klyngen med lave eller høye verdier. Dette støttes også av de parallelle boksplot grafene i figur 4.8-4.10.

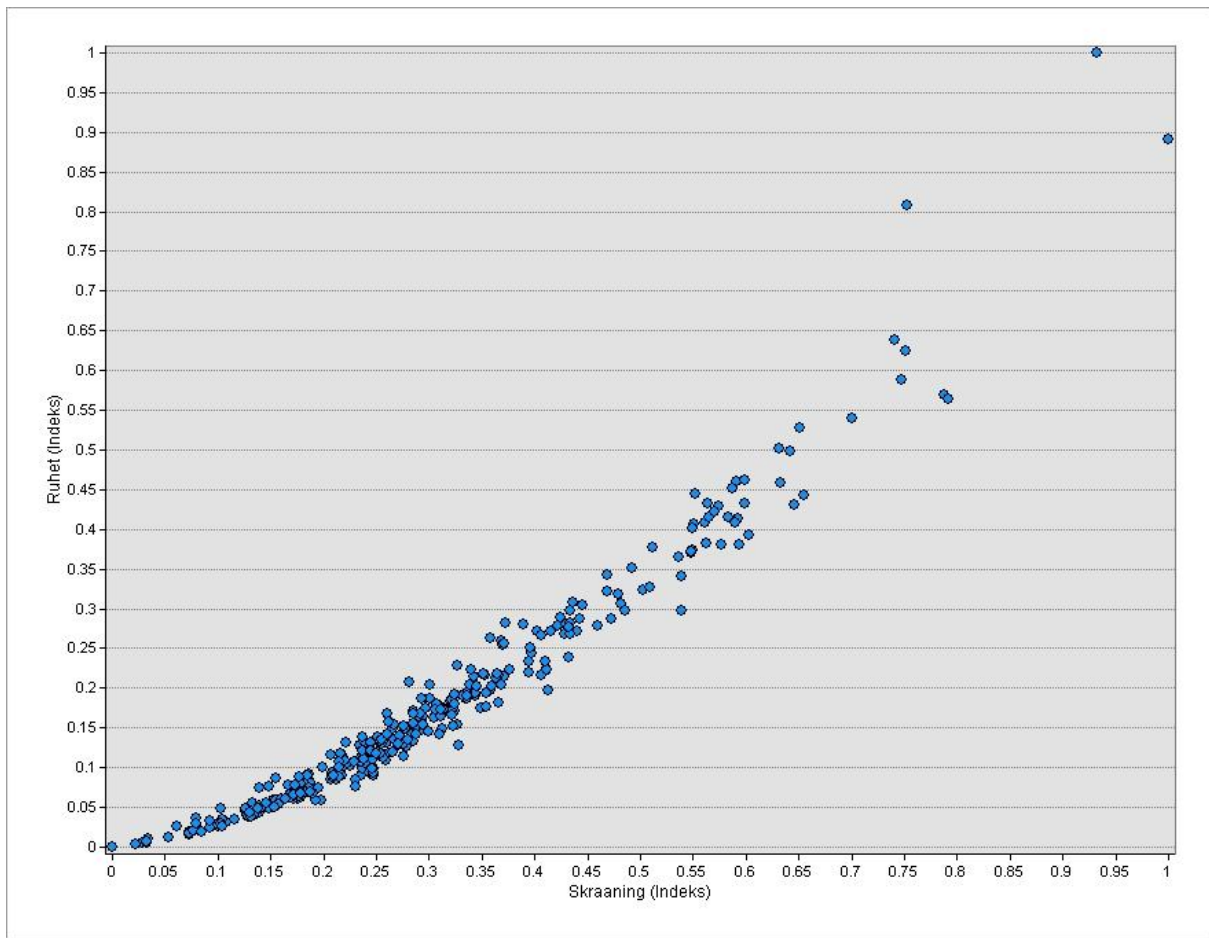


Figur 5.1: Spredningsplot med skråning- og knekkpunktvariablene visualisert. Hvert objekt representerer en elv eller bekk, mens de unike fargene representerer gruppetilhørighet.



Figur 5.2: Spredningsplot med skråning- og knekkpunktvariablene visualisert. Objekter med turkis farge representerer elver og bekker som er blitt konvertert fra flater til linjer, mens grå objekter har vært linjer hele tiden og ikke blitt bearbeidet (se kapittel 3.4.2).

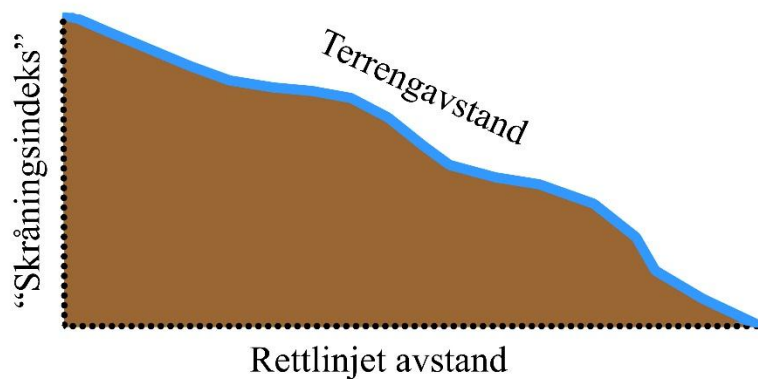
Ved hjelp av slike spredningsplot kan en også undersøke korrelasjonen mellom ulike variabler. Jeg undersøkte hver enkelt mot de andre for å se etter mulige andre feilkilder lignende den som har påvirket knekkpunktvariabelen. Det viste seg å være en svært sterk positiv korrelasjon mellom variablene for skråning og ruhet (figur 5.3). Formålet med grupperingsverktøyet jeg har brukt er å organisere datasettet inn i ulike grupper. Disse to variablene korrelerer imidlertid så sterkt at en kan spørre seg selv om det er vits å ha med begge to. Elver og bekker med en høy skråningsverdi vil i denne oppgavens datasett, i alle tilfeller ha en høy ruhetsverdi. En ser også i de parallelle boksplot grafene (figur 4.8-4.10), og tabellene som viser gruppekriteriene (tabell 4.2-4.4), at grupper som har høyt kriterium for skråningsvariabelen uten unntak også har et tilsvarende høyt kriterium for ruhetsvariabelen.



Figur 5.3: Det er en svært sterk positiv korrelasjon mellom ruhet- og skråningsvariablene. Elvene og bekkene er imidlertid spredt utover nesten hele skalaen til begge variablene. Det er imidlertid en høy konsentrasjon på den nedre delen av skalaen.

Grunnen til at dette er tilfelle kan forklares ut fra grunnleggende trigonometrisk matematikk. I en rettvinklet trekant er som kjent katetene de korteste sidene mens hypotenusen alltid vil være lengst. Ettersom variabelen for ruhet er beregnet ved å dele elvene og bekkenes terrenglengde⁸ på lengden de samme linjene har på et flatt plan, vil ruhetsverdien øke i takt med skråningsverdien. Dette er fordi elve- og bekkeløpet alltid vil renne nedover, og således kan sees på som hypotenusen i en trekant. Skråningsvariabelen kan sees på som den vertikale kateten, mens den rettlinjede avstanden til elve- og bekkeløpet kan sees på som den horisontale kateten. Øker lengden på den vertikale kateten (en økning i skråningsverdi) øker også lengden på hypotenusen (terrenglengden til elve- eller bekkeløpet) (se figur 5.4).

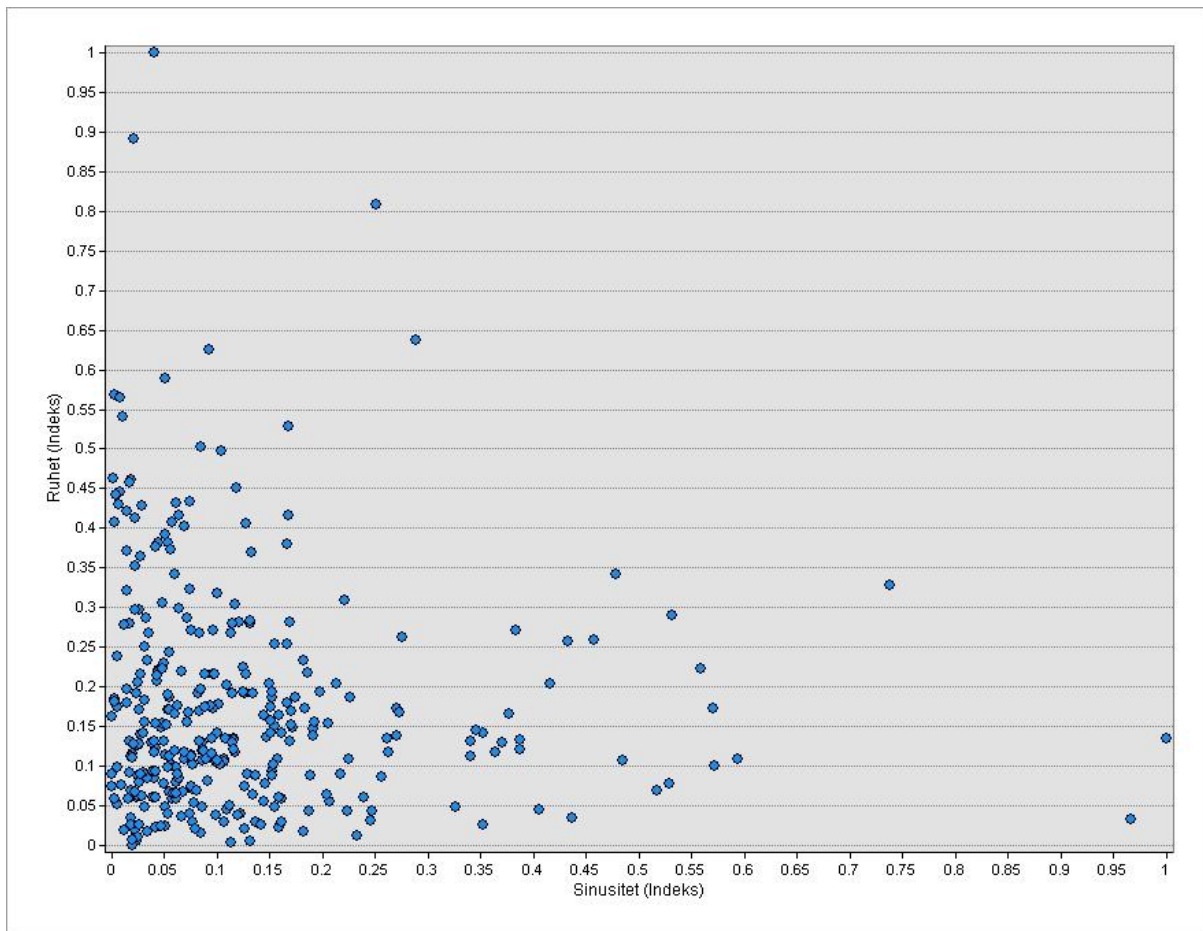
⁸ Lengde som kalkulert ut fra terrengmodellen.



Figur 5.4: Terrengavstanden øker i takt med skråningsverdien på grunn av Pytagoras' setning. Blå farge representerer her vannveien, mens brun farge representerer terrenget.

Dette gjør i prinsippet ruhetsvariabelen overflødig, ettersom den ikke vil dra analyseresultatene hverken den ene eller andre veien, slik som de to andre variablene. Siden den ikke har noen nevneverdig påvirkningskraft på resultatene med mindre jeg fjerner skråningsvariabelen er det imidlertid heller ingenting i veien for å ha den med i analysen.

Variabelen som beskriver sinusitet er i likhet med variablene for ruhet og skråning relativt spredt ut over skalaen fra 0 til 1 (se figur 5.5). Samtidig er mange av elvene og bekkene også på denne konsentrert i den nedre delen av skalaen, noe som tilsier at de aller fleste av elvene og bekkene som ligger innenfor kvikkleiresoner i Trondheim, er relativt rette.



Figur 5.5 Objektene er stort sett konsentrert på den nedre skalaen av både variablene for ruhet og sinusitet. Det er heller ingen nevneverdig korrelasjon mellom disse to variablene.

5.1.2 Feilkilder knyttet til terrengmodellen

Når det gjelder terrengmodellen er det etter min mening liten grunn til å anta at feil i denne har hatt noe spesielt å si for beregningen av variablene til det fluviale datasettet, og de endelige resultatene. Ettersom oppløsningen på modellen er nesten halvparten så lav som punkttettheten i punktskyen den er interpolert fra, har det vært mer enn nok punkter å interpolere høydeverdier fra. Liu et al. (2007) fant ut i sin undersøkelse om punkttetthetens påvirkningsgrad på detaljnivået til høydemodeller, at punkttettheten ofte kunne reduseres drastisk uten at det ville ha noen innvirkning på nøyaktigheten til høydemodellen. Det anbefales imidlertid ikke å bruke en punktsky med for lav punkttetthet til å interpolere en svært høyoppløst terrengmodell. En formel for estimering av optimal-oppløsningen til terrengmodellen ble også presentert:

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

Her er A arealet til området, n er antallet punkter i punktskyen, og S er estimert optimal-oppløsning for terrengmodellen (Liu et al. 2007). Ved å plote inn antallet punkter som ligger til grunn for terrengmodellen i denne oppgaven; 736.330.130, og arealet til Trondheim kommune som er cirka 324 km², får vi $S = 0.66$ meter. Med tanke på at terrengmodellen brukt i denne oppgaven har en romlig oppløsning på 1 meter, er dette mer enn nok punkter for å interpolere korrekte høydeverdier, og reflekterer den gjennomsnittlige punktavstanden på 0.63 meter som ble kalkulert i ArcGIS, jfr. figur 3.7.

Et annet aspekt er imidlertid at om datafangst for LiDAR-punktskyen og det fluviale datasettet har skjedd med stort tidsmellomrom, kan det være at noen av de fluviale systemene har endret karakter. Dette kan føre til at linjene som representerer elver og bekker ikke stemmer overens med terrengmodellen, og er et kjent problem ved bruk av data fra ulike kilder (Gurnell et al. 1994). Fluviale systemer er dynamiske og vil endre seg over tid. Samtidig må årsaker til endringer sees i lys av et tidsperspektiv, og Knighton (1998) påpeker at det er menneskelig aktivitet som vil ha størst innvirkning over kortere tidsperioder. Med andre ord er sannsynligvis de største utfordringene når det kommer til forskjeller i dato for datafangst i denne sammenheng, at menneskelige inngrep kan ha ført til endringer i terrenget eller de fluviale systemene i løpet av perioden fra det første datasettet ble innsamlet, til det andre ble innsamlet. For eksempel ved utgraving og igjenfylling, eller bygging av boliger og infrastruktur, som demmer opp vassdragene.

LiDAR punktskyen ble innsamlet i 2010. Det fluviale datasettet i FKB er imidlertid oppdatert sist i 2012 (Statens Kartverk 2014c). Dette betyr derimot ikke at *alle* elvene og bekkene i dette datasettet ble revidert i 2012. I attributt-tabellen til kildedatasettet står det oppgitt dato for datafangst for hvert objekt i linjedatasettet. Ut ifra denne finner jeg at flesteparten av elvene og bekkene ble kartlagt i 2010, mens noen ble kartlagt i 2008 og 2011. Det betyr at datagrunnlaget for både terrengmodellen og det fluviale datasettet ble innsamlet innenfor en relativt kort tidsramme, og det burde derfor ikke være noen store avvik mellom dem. Dato for kartlegging av objektene i FKB-flate datasettet er derimot ikke oppgitt, men det er naturlig å anta at det har skjedd innenfor samme tidsperiode som linjedatasettet i FKB.

Ideelt sett burde kanskje det fluviale datasettet vært derivert fra terrengmodellen, nettopp for å unngå feil basert på dato for datainnsamling, og fordi jeg har vist at det fluviale datasettet i FKB mangler elver og bekker som er kartlagt i andre datasett (se figur 3.2). Jfr. kapittel 3.3.2 evaluerte jeg imidlertid et slikt egenprodusert datasett som for krevende å beregne for et område

så stort som Trondheim, med de ressursene og den tiden jeg har hatt til rådighet. Standardverktøyene i ArcGIS for modellering av vannveier bruker i tillegg bare en 8-veiers algoritme (ESRI 2011b), noe som Mitasova et al. (1996) påpeker at kan føre til urealistiske resultater. Dette er også min erfaring ved bruk av verktøyet, at vannveier konstrueres der hvor det åpenbart ikke er elver eller bekker i virkeligheten. I tillegg får terrengmodellen store feil når et av de nødvendige verktøyene blir brukt på den. Figur 3.3 illustrerer disse problemene. Murphy et al. (2008) konkluderte imidlertid med at elve- og bekkenettverk derivert fra en LiDAR terrengmodell har store potensialer, og ga bedre resultater enn ved bruk av tradisjonelle lavoppløste terrengmodeller basert på fotogrammetri, i å modellere komplekse vannveier.

5.2 Begrunnelse for analysekriterier

Det finnes mange analysemetoder og algoritmer til forskjellige formål. Kriteriene mine ved valg av analysemetode var at det skulle være en metode som krever lite menneskelig innspill, og at det skulle være relativt lett og raskt å gjennomføre, i tillegg til at det måtte finnes i ArcGIS eller være lett å integrere i arbeidsflyten sammen med ArcGIS. Grouping Analysis verktøyet i ArcGIS ble evaluert som godt egnet for mitt formål og mine data. Til tross for at det er relativt nytt, og det finnes lite informasjon om verktøyet bortsett fra hjelpetekstene til ESRI (2014a; 2014b), virket Grouping Analysis, å oppfylle kriteriene mine. Selv om det finnes lite informasjon fra eksterne kilder om akkurat dette verktøyet, bygger det på en algoritme som er langt ifra ny eller ukjent; nemlig K-Means klyngealgoritmen (Jain 2010). Klyngeanalyser i seg selv er heller ikke noe nytt i GIS verdenen (se f.eks. Etzelmüller et al. 2007). Dette gjorde det enkelt å tilegne seg grunnleggende kunnskap om hvordan verktøyet fungerer.

Selv om verktøyet ikke krever mye menneskelig innspill må en ha en viss forståelse for hvordan de forskjellige elementene i analysen fungerer, slik at man får et resultat som er representativt for det en ønsker å finne ut og formidle. Det er i hovedsak tre forhold en må ta stilling til ved bruk av K-Means algoritmen, hvor det første er viktigst (Jain 2010):

1. Antall grupper (K).
2. Initialiseringsmetode (brukerspesifiserte frø eller tilfeldig frøutvalg).
3. Målemetode for avstand mellom objekter (i dataverdene).

De overnevnte forholdene er ting en må ta stilling til både i ArcGIS og SPSS. ESRI (2014a; 2014b) anbefaler å ikke inkludere for mange variabler i analyseverktøyet Grouping Analysis

til å begynne med. For å se hvordan hver enkelt variabel oppfører seg og påvirker resultatet anbefales det at man starter med én enkelt variabel og tilfører flere gradvis. Ved å se på resultatene og rapportene til hver enkelt analyse vil man kunne finne ut en god del om hvordan de ulike variablene og forskjellige analysekriterier påvirker resultatet, og hva som fungerer best for det aktuelle datasett. Det er i hovedsak dette som ligger til grunn for valg av antall grupper, initialmetode og egen klassifisering, og som nevnt er det gjennomført rundt 50 analyser med ulike gruppe- og variabelkombinasjoner i både ArcGIS og SPSS, for å komme frem til de kriteriene som gir det mest anvendelige resultatet.

5.2.1 Antall grupper

Som nevnt er en av de viktigste tingene man må ta stilling til ved bruk av K-Means og andre klyngealgoritmer, hvor mange grupper en skal organisere datasettet i (ESRI 2014b; Jain 2010; Tibshirani et al. 2001). Uten bruk av Python script er det kun mulig å velge mellom 2 til 15 grupper i Grouping Analysis verktøyet (ESRI 2014b). Det er imidlertid ikke alltid man vet hvor mange grupper som er optimalt for å gruppere et gitt datasett, noe som er tilfelle for det fluviale datasettet brukt i denne oppgaven (ESRI 2014b; Tibshirani et al. 2001). Ettersom det i den første analysedelen kun er brukt kontinuerlige variabler, som i utgangspunktet ikke behøver å ha naturlige klynger, er det spesielt vanskelig å forutse hva som kan være et bra antall grupper. En ting som imidlertid er sikkert å anta ut i fra mine resultater, er at desto flere grupper som brukes desto snevrere vil gruppekriteriene være. Altså vil hver av gruppene i en «3-grupper analyse» omfavne et større antall elver og bekker enn i en «15-grupper analyse», ettersom en større andel av variabelskalaene må inkluderes i hver gruppe for å få plassert alle objektene i så få grupper. Dette er lett å observere ved å se på share-verdiene i tabell 4.2 og 4.3 fra analysene med 3 og 15 grupper. En annen metode er å bruke resultatet fra den kalkulererte pseudo F-indeksen som estimerer hvor mange grupper som er optimalt for det analyserte datasettet (se figur 2.9c) (ESRI 2014b; Caliński og Harabasz 1972).

Ettersom gruppekriteriene blir snevrere og snevrere jo flere grupper en bruker, blir spørsmålet heller hvor like en vil at de sammengrupperte objektene, i dette tilfellet elver og bekker, skal være. Dette er et vanskelig spørsmål, ettersom det sannsynligvis er svært flytende overganger mellom «trygge» og «farlige» elve- og bekkekaraktistikker i forhold til utløsning av kvikkleireskred. Erosjon kan som kjent foregå både i elvebunnen og i elvekantene (Sulebak 2007), hvor yttersvingene er det vanligste (Fergus et al. 2010). Det som imidlertid er felles er

at elven eller bekkens arbeidspotensiale øker i tråd med vannhastigheten, som igjen øker jo brattere terrenget er (Sulebak 2007). Jeg har derfor antatt at de elvene og bekkene som har spesielt høy skråningsverdi kan anses som farligere enn de som har en jevnt over lav skråningsverdi. Dette er grunnen til at jeg har plukket ut de 4 gruppene fra resultatet i «15-grupper analysen», hvor 3 av gruppene har det jeg anser som «farligere» karakteristikk, i forhold til gruppen til bekken på Byneset (en høyere skråning-, ruhet- og sinusitetsverdi).

Til tross for at pseudo F-indeksen indikerer at et lavere antall grupper, rundt 3-5 som optimalt for datasettet i denne oppgaven, vil utvalget på 4 grupper fra «15-grupper analysen» være et mer fleksibelt resultat og grunnlag for den andre delanalysen. Ettersom disse 4 gruppene totalt sett er nærmest identisk med den ene gruppen fra «3-grupper analysen», og analysene i SPSS med 3 grupper, er det etter min mening ikke noe problem å bruke dette som resultat selv om pseudo F-indeksen indikerer noe annet.

5.2.2 Initialiseringsmetode

Jain (2010) nevnte også at initialmetode er en av de få tingene brukeren må ta stilling til i en K-Means analyse; om noen av objektene skal fungere som frø eller ikke, og i så fall hvilke. Dette ble også introdusert i kapittel 2.4. Til denne analysens formål er det i hovedsak to muligheter; å la verktøyet velge 15 tilfeldige frø med så stor avstand mellom hverandre (i dataverdenen) som mulig, eller å definere bekken som utløste skredet på Byneset som et frø og la verktøyet plukke ut de resterende 14 (ESRI 2014a).

Som en ser i figur 4.4 og 4.5, og tabell 4.3 og 4.4, er resultatene mellom «15-grupper analysene» med og uten bekken på Byneset som frø noe forskjellig. Det som er spesielt bemerkelsesverdig er at resultatene fra SPSS, som også har tilfeldig utvalgte frø, i større grad stemmer overens med resultatene fra Grouping Analysis verktøyet i ArcGIS når bekken på Byneset blir brukt som frø, enn når de blir valgt tilfeldig. Resultatet fra «15-grupper analysen» med bekken på Byneset som frø var etter min mening det mest anvendelige resultatet å bruke videre, til tross for at resultatene ikke er fundamentalt forskjellig fra analysen med tilfeldig valgte frø.

5.2.3 Delanalyse 2, og egen klassifisering

Resultatene fra den første delanalysen er et utvalg elver og bekker som jevnt over deler de samme karakteristikkene som bekken som utløste skredet på Byneset, eller som har høyere skråning-, ruhet- og sinusitetsverdi. Knekkpunktvariabelen var det etter min mening ikke nødvendig å ta like stort hensyn til ettersom den er påvirket av feilkilder i datasettet og separert i to klynger med enten høye eller lave verdier (jfr. kapittel 3.4.2 og 5.1.1). Jeg brukte det samme verktøyet i ArcGIS til å analysere disse elvene og bekkene basert på indeksene for skredfaregrad og konsekvensgrad.

I første omgang ble bare variablene som representerer prosentandelen av det totale elve- eller bekkeløpet innenfor faresone 1, 2, 3 og utenfor faresone brukt. Konsekvensvariabelen ble videre lagt til for å undersøke hvilke elver og bekker som i tillegg til å ha høyest sannsynlighet for å utløse skred, vil gjøre størst samfunnsmessig skade. Til slutt brukte jeg både variablene for fare og konsekvens, i tillegg til en variabel som beskriver gruppetilhørigheten til hver av elvene og bekkene, fra resultatet i første delanalysen. Pseudo F-indeksen beregnet 14 grupper som optimalt i denne siste analysen, noe som også ble brukt.

Resultatene i den andre delanalysen ble rangert manuelt basert på gruppekriteriene til hver gruppe. Disse rangeringskriteriene står oppført i tabell 4.6 og 4.7. Ettersom faregrad 3, som er den høyeste faregraden indikerer at det er aktiv erosjon i vassdragene innenfor disse kvikkleiresonene anså jeg denne som svært viktig i rangeringen (Gregersen 2008), noe som er grunnen til at gruppene jeg har rangert som «farligst» alle inneholder elver og bekker hvor over 90% av elve- eller bekkeløpet befinner seg innenfor faresone 3. Alle resultatene ble rangert basert på eget skjønn, ettersom grupperingsverktøyet i ArcGIS ikke har mulighet tolke og rangere de resulterende gruppene. Jeg vektet faregrad høyest, mens konsekvensgrad og gruppetilhørighet fra første delanalyse ble vektet tilnærmet likt. En slik manuell rangering er naturligvis ikke alltid optimalt, men i denne sammenheng var det ingen alternativer.

Også i den andre delanalysen er analysene gjennomført i SPSS med like kriterier, for å undersøke om verktøy basert på lignende algoritmer gir like resultater. Resultatene fra SPSS stemte også her generelt godt overens med resultatene fra verktøyet i ArcGIS. Dette fungerer, om ikke annet, som en bekreftelse på at verktøyet i ArcGIS fungerer som det skal.

5.2.4 Fordeler og ulemper med bruk av verktøy i ArcGIS og SPSS

Som nevnt har datasettet blitt analysert i både ArcGIS og SPSS. Dette fordi SPSS har verktøy som baserer seg på samme algoritme som blir brukt i Grouping Analysis i ArcGIS (ESRI 2014b; IBM 2012a). Begge programmene har fordeler og ulemper som gjør dem egnet til ulike bruksområder.

En av fordelene med å bruke analyseverktøy i ArcGIS er blant annet at organisering av filer og tabeller som skal brukes i analysen er enklere ved hjelp av ulike databaseformater, og følgelig bedre integrering i den generelle arbeidsflyten i ArcGIS. En slipper blant annet å konvertere mellom formater og eksportere til eksterne analyseprogrammer, for så å importere resultatene tilbake og koble de til sine respektive tabeller. Dette er ofte en tidkrevende prosess som fort blir uoversiktlig. Den kanskje største ulempen med akkurat Grouping Analysis verktøyet er imidlertid at det finnes lite litteratur om bruk av dette verktøyet. Til gjengjeld har ESRI (2014a; 2014b) grundige hjelpetekster som gjør verktøyet relativt raskt å lære. I tillegg finnes det svært mye litteratur om klyngeanalyse og K-Means algoritmen, som verktøyet bygger på (Jain 2010).

Når det kommer til SPSS og de verktøyene jeg har brukt i dette programmet, er det som skiller seg mest ut at SPSS er svært mye raskere, i forhold til Grouping Analysis i ArcGIS. Analysene gjennomføres på få sekunder, noe som gjør at å kjøre mange analyser med forskjellige kriterier etter hverandre går meget raskt. I motsetning kan analyser med verktøyet i ArcGIS ta opptil flere minutter. En av grunnene til dette er nok at verktøyet i ArcGIS leverer resultatene som en ny tabell med ferdig symbologi, og ikke bare et nytt felt i tabellen som angir gruppetilhørighet. Den omfattende rapporten leveres også i PDF-format, som ESRI (2014b) selv påpeker at kan ta tid å generere. Rapporten er imidlertid valgfri, så en kan spare tid på å la være å velge denne i tillegg. Fordelene med disse rapportene er etter min mening så stor at den veier opp for den ekstra tiden det tar.

5.3 Evaluering av analysemetode og resultater

Selv om gjennomføringen av analysene er relativt enkelt er det imidlertid ikke gitt at tolkingen av resultatene er det, og at resultatene i det hele tatt er realistiske. Til tross for at K-Means analysealgoritmen i utgangspunktet er enkel å skjønne, kan metoden etter min mening virke lite transparent; altså at det ikke alltid er så lett å forstå hvorfor ting blir som de blir. Jeg vil derfor til slutt reflektere over den valgte analysemetoden og om resultatene er brukbare for aktsomhetskartlegging, som var det siste av delspørsmålene til problemstillingen. Formålet

med denne oppgaven var imidlertid ikke å evaluere hvilken analysemetode eller algoritme som er best skikket til å identifisere skredfarlige elver og bekker, men heller om det i det hele tatt er mulig å gjennomføre en analyse basert på data lett tilgjengelige data, og i så fall hvordan.

Det som kan sees på som de endelige resultatene i denne oppgaven er presentert i figur 4.11-4.13 og tabell 4.6 og 4.7. Selv om det er brukt 14 grupper i det siste resultatet av den andre delanalysen, har jeg valgt å slå disse sammen og rangere de i klasser fra 1 til 5 slik som de to foregående resultatene. Dette er i hovedsak fordi flere klasser betyr flere farger, noe som gjør det vanskeligere å skille klassene fra hverandre. Det er imidlertid ikke slik at elver og bekker med grønn farge skal sees på som «trygge».

5.3.1 Klyngeanalyse som verktøy

Selv om jeg har kommet frem til konkrete resultater er jeg noe skeptisk til om de er realistisk, av en rekke årsaker. Først og fremst ser det ut som Grouping Analysis verktøyet i ArcGIS krever mye mindre kunnskap om klyngealgoritmer og statistisk analyse generelt, enn det som faktisk er tilfelle. Jain og Dubes (1988) påpeker at det kan være vanskelig å definere hva som faktisk er en klynge. Hvor separert fra de andre klyngene må en klynge være for at den kan kalles en «gyldig» klynge? Som en ser i figur 5.1, 5.3 og 5.5 er noen variabler i denne analysen mer skikket til å dele inn i klynger enn andre. Skråning- og ruhetsvariablene har objekter jevnt fordelt utover nesten hele variabelskalaen, noe som gjør det lett å fordele objektene inn i ulike grupper. Knekkpunkt- og sinusitetsvariablene er på sin side mer konsentrert uten klart definerte naturlige klynger. Brukeren bør derfor ifølge Jain og Smith (1984, som sitert i Jain 2010 s. 657), på forhånd evaluere om datasettet har tendenser til klynger, og om dette har naturlige årsaker, eller om det er basert på feil i datasettet jfr. for eksempel feilkilden som påvirket knekkpunktvariabelen.

I tillegg til kunnskap om statistisk analyse kreves det også en god forståelse for hva datasettet representerer. I dette tilfellet representerer datasettet som kjent elver og bekker. Dette er svært komplekse fluviale systemer (Knighton 1998), som vanskelig kan sees på som statiske objekter slik de er behandlet i denne oppgaven (Kondolf et al. 2003). Analysene er i tillegg basert på få svært generelle karakteristikk ved elvene og bekkene i Trondheim. I realiteten vil det være mange flere faktorer som påvirker utløsingen av kvikkleireskred. For eksempel, selv om jeg antar at erosjonskapasiteten er størst i elver og bekker med høy skråningsgradient, er det også andre forhold som spiller inn, som bunnmateriale, lokal turbulens, naturlig eller

menneskebestemt løpsmønster o.l. (Sulebak 2007; Fergus et al. 2010). Som Mitasova et al. (1996) konkluderer i sin undersøkelse om det er mulig å modellere potensiale for erosjon og sedimentasjon ved hjelp av GIS, vil det være nødvendig med påfølgende feltbefaring for å validere resultatene, noe som for min del ville blitt et svært omfattende prosjekt for et studieområde så stort som hele Trondheim kommune.

Kondolf et al. (2003) påpeker at hvilke variabler som egner seg for bruk i en klyngeanalyse er avhengig av hvor godt de lar seg måle. Videre påpekes det også at klassifiseringsmetoder av elver og bekker med kan være fristende å bruke for personer uten geo-faglig bakgrunn, og som ikke forstår kompleksiteten i fluviale systemer (Kondolf et al. 2003). En skal derfor være forsiktig med å trekke konkrete konklusjoner ut fra slike klassifiseringsanalyser, spesielt om det ikke suppleres med feltundersøkelser for å underbygge resultatene. Jeg har imidlertid hele tiden hatt i bakhodet at fire variabler ikke vil kunne gi et komplett realistisk bilde av virkeligheten i en sammenheng som dette, men at resultatene må sees i lys av de variablene som er brukt, og konteksten til elementene som analyseres (Lane og Richards 1997).

Et av problemene med analyser slik som denne er at elvene og bekkene blir sett på som statiske. Som diskutert i delkapittel 5.1.2 har innsamlingstidspunktet til de forskjellige datasettene mye å si for om de er kompatible med hverandre (Gurnell et al. 1994). En annen side ved dette er at siden elver og bekker er dynamiske systemer (Knighton 1998), vil resultater fra analyser lik denne bare kunne gjelde for det tidspunktet data ble innsamlet, ettersom temporære variasjoner ikke tas høyde for (Kondolf et al. 2003). Det er ikke gitt at de fluviale systemene var stabile når data ble innsamlet, og for å ta høyde for temporære variasjoner i elver og bekker må flere datainnsamlinger og påfølgende analyser kanskje gjennomføres.

5.3.2 Evaluering av resultatene

Når det gjelder resultatene fra analysene i denne oppgaven er det ikke store forskjeller mellom de tre resultatene i den andre delanalysen (figur 4.11-4.13). Det er selvfølgelig noen elver og bekker som endrer klasse blant de tre analysene, men det er alltid i det uthevede området, rett nord for Heimdal og Tiller, at en finner de elvene og bekkene som jeg har klassifisert som mest sannsynlige for å utløse skred og utøve størst skade. Resultatene som er presentert i figur 4.12 og 4.13 er det også mulig å sammenligne med rangeringen gjort på bakgrunn av NVE og NGIs klassifisering for skredrisiko (figur 4.14). Resultatene jeg har kommet frem til er åpenbart annerledes. Ved å rangere elvene og bekkene basert på NVE og NGIs risikoklassifisering av

kvikkleiresonene, blir elvene og bekkene jevnt over rangert høyere på skalaen, men med færre i både topp og bunn av rangstigen. En av årsakene til dette kan være at analysene som ligger til grunn for mine resultater er basert på færre parametere enn NVE og NGIs klassifiseringer (tabell 3.1), som også tar høyde for en rekke andre parametere enn kun erosjon i vassdrag (Gregersen 2008). Å i det hele tatt inkludere konsekvens og risikoindeksene i rangeringen kan også gi noe misvisende resultater, ettersom disse indeksene beskriver andre forhold enn kun sannsynligheten for utløsning av skred. Resultatene fra den andre delanalysen (figur 4.11-4.13) viser imidlertid at det ikke er veldig store endringer i resultatene om bare faregradindeksen er med i forhold til om alle indeksene er med. Faregradindeksen har også hele tiden vært vektet høyest i rangeringene mine.

Vassdraget som renner gjennom kvikkleiresonen i det området hvor flesteparten av de elvene og bekkene som ble identifisert og klassifisert som mest sannsynlige for å utløse nye skred, heter Leirelva og renner fra Leirsjøen via Stavset og ut ved Sluppenbrua. Det foreligger en rapport fra grunnundersøkelser gjort i dette området i 2011. Grunnundersøkelsen som omtales i denne rapporten ble gjort på bakgrunn av tidligere utglidninger i området mot Leirelva. Resultatene viste imidlertid at det ikke fantes kvikkleire tilknyttet kvikkleiresonen i det området som ble undersøkt (Trondheim kommune 2011). Om det betyr at erosjon i disse elvene og bekkene ikke utgjør noen trussel for de nærliggende kvikkleireområdene er vanskelig å ta stilling til, ettersom kvikkleiresonen er forholdsvis stor, og rapporten kun var basert på én grunnundersøkelse. Eventuelle feltbefaringer i det innrammede området i figur 4.11-4.13 ville kunne avdekke om dette faktisk er elver og bekker som har stor sannsynlighet for utløsning av nye kvikkleireskred i dette området.

Til slutt vil jeg påpeke at ESRI (2014b) omtaler Grouping Analysis verktøyet som utforskende, noe jeg absolutt mener at resultatene må tolkes som. Verktøyet er lett anvendelig og resultatene er forholdsvis enkle å tolke, om man har data av tilstrekkelig kvalitet. Det er imidlertid slik at algoritmer slik som Grouping Analysis og K-Means Cluster bygger på, ikke kan produsere noe rett eller galt svar (IBM 2012a). Det er opp til brukeren å evaluere om de resulterende gruppene kan beskrive datasettet som er analysert. En skal derfor, som tidligere nevnt, være kritisk til resultatene, og eventuelle slutninger bør kun trekkes etter at resultatene er supplert med feltbefaring. Metoden kan imidlertid etter min mening inngå som et tidlig ledd i en større analyseprosess for identifisering av mulige årsaker til kvikkleireskred.

6 Konklusjon

Denne oppgaven har undersøkt om det er mulig å gjennomføre en områdeanalyse i et GIS med lett tilgjengelige og høyoppløste stedfestede data, for å identifisere hvilke elver og bekker som har størst sannsynlighet for å utløse fremtidige kvikkleireskred i Trondheim, basert på data fra bekken som utløste skredet på Byneset i 2012. Jeg har gjennom denne oppgaven vist en fremgangsmåte for hvordan dette er mulig. Innledningsvis formulerte jeg tre delspørsmål for å lettere kunne besvare oppgaven. Disse har blitt diskutert i kapittel 5. Under har jeg formulert en konklusjon til hvert av delspørsmålene, etterfulgt av noen avsluttende bemerkninger basert på erfaringer ervervet gjennom bearbeiding- og analyseprosessen.

1. Hvordan kan man representere relevante kjennetegn for bekken som utløste skredet på Byneset i 2012, som sammenlignbare variabler for bruk i en analyse?

Jeg har gjennom bearbeidingsprosessen vist at det er relativt enkelt å beregne ulike variabler som beskriver generelle karakteristikk som skråning, ruhet og sinusitet, ut fra en høyoppløst terrengmodell og tilhørende høyoppløst fluvialt datasett. Slike variabler viser seg imidlertid å være sårbare for feil påført under bearbeidingsprosessen. Et mer nøyaktig fluvialt datasett basert på en høyoppløst terrengmodell hadde vært å foretrekke, men er i seg selv krevende å lage for et stort område.

2. Hvordan kan man gjennomføre en analyse av elvene og bekkene i Trondheim, for å identifisere elver og bekker som har karakteristikk som kan føre til utløsning av nye kvikkleireskred?

Ved hjelp av klyngeanalyse som det finnes verktøy for både i ArcGIS og SPSS, er det relativt enkelt å utføre en slik områdeanalyse. Verktøyene er enkle og raske i bruk, og det er relativt enkelt å tolke resultatene. Dette krever imidlertid en grundig forståelse for de variablene som brukes i analysen, og hva disse representerer. For å komme frem til et realistisk resultat må en vurdere om variablene som er gjenstand for analysen er representative nok.

3. Er resultatene fra en slik analyse gode nok til å bruke i en aktsomhetskartlegging for fremtidige kvikkleireskred?

Opgaven viser at resultatene er avhengige av hvilke og hvor mange karakteristikk av vassdragene som benyttes. Jeg har benyttet et lite utvalg generelle karakteristikk. Dette gjør det nødvendig å følge opp resultatene fra analysene med undersøkelser i felt før resultatene kan

brukes i konkret aktsomhetskartlegging. Videre er det av betydning at datasettene er mest mulig oppdaterte, da det over tid kan skje endringer i vassdragene.

6.1 Avsluttende bemerkninger

Metodikken i denne oppgaven er basert på grunnleggende prinsipper i GIS og statistisk analyse. Dette gjør at den ikke er stedbunden, og teoretisk sett vil det være mulig å gjennomføre en lik områdeanalyse i hvilket som helst område eller kommune. I praksis vil foreliggende data variere kraftig fra område til område, og ikke minst de geologiske og geomorfologiske forutsetningene. Dette gjør det per i dag vanskelig å reprodusere analysen i andre deler av landet. Når den nye nasjonale høyoppløste terrengmodellen er ferdig utarbeidet vil vi imidlertid være et steg nærmere å kunne utføre slike avanserte analyser i hele landet.

Denne oppgaven og resultatene kan etter min mening sees på som et utgangspunkt for videre undersøkelser og ikke minst som et metodisk eksempel på hvordan slike høyoppløste geografiske data, sammen med analytiske teknikker kan brukes til å kartlegge potensielle årsaker til både skred og andre naturkatastrofer. Ved videre undersøkelser er det viktig å være oppmerksom på følgende forhold:

- For å kunne bruke statistisk analyse og klyngealgoritmer til å gruppere vassdrag med lignende karakteristikk kreves det en grunnleggende forståelse for fluviale systemers kompleksitet. Etter min mening bør slike analyser gjøres av, eller i samarbeid med personer med fluvialgeomorfologisk bakgrunn.
- Etersom både naturlige prosesser og menneskelige inngrep endres over tid kan resultatene fra analyser lik denne kun gjelde for det tidspunktet data ble innsamlet. Det er derfor hensiktsmessig å bruke så oppdaterte data som mulig, innsamlet i løpet av en kort tidsperiode fra hverandre for å unngå inkompatibilitet, hvis flere datakilder brukes.
- Ved bruk av klyngealgoritmer, bør man på forhånd og underveis undersøke om feilkilder i datasettet påvirker variablene, eller om noen av variablene har sterk positiv eller negativ korrelasjon med hverandre. Dette kan føre til unaturlige grupperinger.

- Analysekr terier som antall grupper og initialmetode kan også påvirke resultatene. Det er derfor viktig   eksperimentere med ulike sammensetninger, spesielt om man ikke på forhånd vet hvor mange grupper som er optimalt. Pseudo F-indeksen og andre mål på det antatt optimale antall grupper må også sees på som veiledende, ikke endelige.

Referanseliste

- Agarwal, S., Arshat, B. og Benham, S. (2003). *Aerial Mapping Best Practices*. Tilgjengelig fra: <http://ejournal.com/2013/aerial-mapping-best-practices> (Hentet: 4. april 2014)
- Ali, T. A. (2004). On the selection of an interpolation method for creating a terrain model (TM) from LIDAR data. *Proceeding of the American Congress on Surveying and Mapping (ACSM) Conference 2004*, s. 1-18.
- Aronoff, S. (2005). *Remote Sensing for GIS Managers*. Redlands, USA: ESRI Press.
- Aronoff, S. og Petrie, G. (2005). Active sensors: Radar and lidar. I Aronoff, S., *Remote Sensing for GIS Managers*. (s. 197-244). Redlands, USA: ESRI Press
- Askheim, S. (2012). *Rissaskredet*. I Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: <http://snl.no/Rissaskredet> (Hentet: 6. april 2014).
- Berthling, I. (2013). Skredfare i Norge i et fremtidig klima. I Bye, L., Lein, H., og Rød, J. K. (red.), *Mot en farligere fremtid?* (1. utg., s. 69-87). Trondheim, Norge: Akademia Forlag.
- Bjerrum, L. (1955). Stability of Natural Slopes in Quick Clay. *Géotechnique*, 5(1), s. 101-119.
- Brochmann, M., et al. (2012). International Borders and Conflict Revisited. *Conflict Management and Peace Science*, 29(2), s. 170-194. DOI: 10.1177/0738894211433164.
- Burt, T. (2009). Scale: Resolution, Analysis and Synthesis in Physical Geography. I Clifford N. J., Holloway, S. L., Rice, S. P. og Valentine, G., *Key Concepts in Geography*. (2. utg., s. 200-216). London, England: Sage Publications Ltd.
- Caliński, T. og Harabasz, J. (1972). A dendrite method for cluster analysis. *Communications in statistics*, 3(1), s. 1-27. DOI: 10.1080/03610927408827101.
- Carstens, H. (2012). *Liten bekk veltet stort lass*. Tilgjengelig fra: <http://www.geo365.no/katastrofer/leirskred-byneset/> (Hentet: 22. januar 2014).

- Dilts, T. (2011). *Polygon to Centerline*. Tilgjengelig fra: <http://resources.arcgis.com/gallery/file/geoprocessing/details?entryID=EF0C96FF-1422-2418-7F9F-B0A8839FC796> (Hentet: 4. september 2013).
- e-Education/ASPRS. (udatert). *Characteristics of Lidar data*. Tilgjengelig fra: <https://www.e-education.psu.edu/lidar/book/export/html/1873> (Hentet: 11. mai 2014).
- Ekroll, H. C. (2013). *Utredet i tre måneder, men sjekket ikke grunnforhold*. Tilgjengelig fra: <http://www.aftenposten.no/nyheter/iriks/Utredet-i-tre-maneder-men-sjekket-ikke-grunnforhold-7141752.html> (Hentet: 22. januar 2014).
- ESRI. (2014a). *Grouping Analysis (Spatial Statistics)*. Tilgjengelig fra: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.2/index.html#//005p00000051000000> (Hentet: 25. februar 2014).
- ESRI. (2014b). *How Grouping Analysis works*. Tilgjengelig fra: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.2/index.html#//005p0000004w000000> (Hentet: 25. februar 2014).
- ESRI. (2013a). *How inverse distance weighted interpolation works*. Tilgjengelig fra: <http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//00310000002m0000000> (Hentet 5. mai 2014).
- ESRI. (2013b). *What is LiDAR data?*. Tilgjengelig fra: http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/What_is_lidar/015w000000041000000/ (Hentet: 20. januar 2014).
- ESRI. (2013c). *Working with LAS classification in ArcGIS*. Tilgjengelig fra: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//015w00000047000000> (Hentet: 20. januar 2014).
- ESRI. (2013d). *Lidar point classification*. Tilgjengelig fra: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//015w0000005q000000> (Hentet: 20. januar 2014).
- ESRI. (2013e). *Storing LiDAR data*. Tilgjengelig fra: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//015w00000054000000> (Hentet: 20. januar 2014).

- ESRI. (2013f). *Point File Information (3D Analyst)*. Tilgjengelig fra:
<http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//00q900000025000000>
(Hentet: 4. februar 2014).
- ESRI. (2013g). *Dissolve (Data Management)*. Tilgjengelig fra:
<http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//001700000005n0000000>
(Hentet: 7. februar 2014).
- ESRI. (2013h). *Unsplit Line (Data Management)*. Tilgjengelig fra:
<http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//00170000000400000000>
(Hentet: 21. februar 2014).
- ESRI. (2012a). *LAS Dataset To Raster (Conversion)*. Tilgjengelig fra:
<http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//00120000000520000000>
(Hentet: 4. april 2014).
- ESRI. (2012b). *Add Surface Information (3D Analyst)*. Tilgjengelig fra:
<http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//00q900000001600000000>
(Hentet: 25. februar 2014).
- ESRI. (2012c). *About joining the attributes of features by their location*. Tilgjengelig fra:
http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/About_joining_the_attributes_of_features_by_their_location/005s0000000310000000/ (Hentet: 24. februar 2014).
- ESRI. (2011a). *What is ModelBuilder?*. Tilgjengelig fra:
[http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//002w000000010000000000](http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//002w0000000100000000)
0 (Hentet: 7. februar 2014).
- ESRI. (2011b). *How Flow Direction works*. Tilgjengelig fra:
<http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//009z0000000630000000>.
[htm](#) (Hentet: 3. mai 2014).
- Etzelmüller, B., Romstad, B. og Fjellanger, J. (2007). Automatic regional classification of topography in Norway. *Norwegian Journal of Geology*, 87, s. 167-180.
- Fergus, T., Hoseth, K. A. og Sæterbø, E. (2010). *Vassdragshåndboka*. (2. utg.). Trondheim: Tapir Akademisk Forlag.

Furseth, A. (2006). *Skredulykker i Norge*. (1. utg.). Oslo: Tun Forlag.

Geomatikkbransjen. (2014). *Raset på Byneset*. Tilgjengelig fra:
<http://geomatikkbransjen.no/?cat=85> (Hentet: 18. februar 2014).

Gregersen, O. (2008). *Program for økt sikkerhet mot leirskred*. Tilgjengelig fra:
http://www.nve.no/PageFiles/3743/20081008-2_Kartlegging%20og%20klassifisering%20av%20faresoner%20kvikkleire_Rev03_final.pdf (Hentet: 30. januar 2014).

Gurnell, A. M., Angold, P. og Gregory, K. J. (1994). Classification of river corridors: Issues to be addressed in developing an operational methodology. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 4(3), s. 219–231.
DOI: 10.1002/aqc.3270040304.

Heritage, G. og Hetherington, D. (2007). Towards a protocol for laser scanning in fluvial geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, s. 66-74. DOI: 10.1002/esp.1375.

Kao, D., Kramer, M., Luo, A., Dungan, J. og Pang, A. (udatert). *Visualizing Distributions from Multi-Return Lidar Data to Understand Forest Structure*. Tilgjengelig fra:
<http://slvg.soe.ucsc.edu/lidar.html> (Hentet: 3. mars 2014).

Lane, S. N. og Richards, K. S. (1997). Linking river channel form and process: Time, space and causality revisited. *Earth surface processes and landforms*, 22, s. 249-260.

L'Heureux, J.-S., Locat, A., Leroueil, S., Demers, D. og Locat, J. (2014). Landslides in Sensitive Clays: From Geosciences to Risk Management. *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, 36. doi: 10.1007/978-94-007-7079-9_28.

Heywood, I., Cornelius, S. og Carver, S. (2006). *An Introduction to Geographic Information Systems*. (3. utg.). England: Pearson Education Limited.

Holmsen, P. (1953). Landslips in Norwegian Quick-Clay. *Géotechnique*, 3(5), s. 187-194.

IBM. (2012a). *Clustering Models*. Tilgjengelig fra:
http://pic.dhe.ibm.com/infocenter/spssmodl/v15r0m0/index.jsp?topic=%2Fcom.ibm.sps.modeler.help%2Fnodes_clusteringmodels.htm (Hentet: 3. mars. 2014).

- IBM. (2012b). *TwoStep Cluster Node*. Tilgjengelig fra:
http://pic.dhe.ibm.com/infocenter/spssmodl/v15r0m0/index.jsp?topic=%2Fcom.ibm.sps.modeler.help%2Fclusternode_general.htm (Hentet: 22. mars 2014).
- Jaedicke, C., Lied, K. og Kronholm, K. (2009). Integrated database for rapid mass movement in Norway. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, s. 469-479.
- Jain, A. K. (2010). *Data clustering: 50 years beyond K-means*. *Pattern Recognition Letters*, 31, s. 651-666.
- Knighton, D. (1998). *Fluvial Forms & Processes – A new perspective*. (1. utg.). New York, USA: Oxford University Press Inc.
- Kondolf, G. M., Montgomery, D. R., Piégay, H. og Schmitt, L. (2003). Geomorphic Classification of Rivers and Streams. I Kondolf, G. M. og Piégay, H. (Red), *Tools in Fluvial Geomorphology* (s. 171-204). Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- Lie, Ø. (2013). *Kartverket vil lage 3D-modell av terrenget i hele Norge*. Tilgjengelig fra:
<http://www.tu.no/bygg/2013/12/18/kartverket-vil-lage-3d-modell-av-terrenget-i-hele-norge> (Hentet: 22. desember 2013).
- Liu, X., Zhang, Z., Peterson, J. og Chandra, S. (2007). The effect of LiDAR data density on DEM accuracy. *Proceedings of International Congress on Modelling and Simulation 'MODSIM07'*, 10-13 desember 2007, Christchurch, New Zealand, s. 1363-1369.
- Liu, X. (2008). Airborn LiDAR for DEM generation: some critical issues. *Progress in Physical Geography*, 32(1), s. 31-49. DOI: 10.1177/0309133308089496.
- Lloyd, C. D. og Atkinson, P. M. (2002). Deriving DSMs from LiDAR data with kriging. *International Journal of Remote Sensing*, 23(12), s. 2519-2524. DOI: 10.1080/01431160110097998.
- Lloyd, C. D. og Atkinson, P. M. (2006). Deriving ground surface digital elevation models from LiDAR data with geostatistics. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(5), s. 535-563. DOI: 10.1080/13658810600607337.

Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J. og Rhind, D. W. (2011). *Geographic Information Systems & Science*. (3. utg.). New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc.

mi

Lovdata. (2010). *Lov om infrastruktur for geografisk informasjon (geodataloven)*. Tilgjengelig fra: <http://lovdata.no/dokument/NL/lov/2010-09-03-56> (Hentet: 8. mai 2014).

Mitasova, H., Hofierka, J., Zlocha, M., og Iverson, L. R. (1996). Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *International Journal of Geographic Information Systems*, 10(5), s. 629-641. DOI: 10.1080/02693799608902101.

Movshovitz-Hadar, N. og Shmukler, A. (2006). *River Meandering and a Mathematical Model for this Phenomenon*. Tilgjengelig fra: http://www.academia.edu/2619483/The_Mathematics_of_River_Meanders (Hentet 6. mai 2014).

Murphy, P. N. C., Ogilvie, J., Meng, F.-R. og Arp, P. (2008). Stream network modelling using lidar and photogrammetric digital elevation models: a comparison and field verification. *Hydrological Processes*, 22, s. 1747-1754. DOI: 10.1002/hyp.6770.

Mæhlum, L. (2013). *Waldo Tobler*. I Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: http://snl.no/Waldo_Tobler (Hentet 7. april 2014).

Mællingsæter, H. (2011). *Gigantbarnehage er bygget på kvikkleire*. Tilgjengelig fra: <http://www.aftenposten.no/nyheter/Gigantbarnehage-er-bygget-pa-kvikkleire-6705871.html> (Hentet: 22. januar 2014).

Norge Digitalt. (2014). *Om Norge digitalt*. Tilgjengelig fra: http://159.162.103.4/norgedigitalt.no/Norge_digitalt/Norsk/Om_oss/ (Hentet: 16. januar 2014).

Norge i bilder. (2013). *Flyfoto fra skredområdet på Byneset i Trondheim*. Tilgjengelig fra: <http://www.norgebilder.no/?zoom=13&lat=7029593.06877&lon=557102.99874&srs=EPSG:32632> (Hentet: 14. mars 2013).

NVE. (2014). *Skredatlas*. Tilgjengelig fra: <http://skredatlas.nve.no/ge/Viewer.aspx?Site=Skredatlas> (Hentet: 4. september 2013).

- NVE. (2013). *Nedlasting av Geodata fra NVE*. Tilgjengelig fra: <http://arcus.nve.no/nvedatanedlast/default.aspx> (Hentet: 18. oktober 2013).
- NVE. (2012). *Kvikkleireskred ved Esp, Byneset i Trondheim*. Tilgjengelig fra: <http://www.nve.no/Global/Publikasjoner/Publikasjoner%202012/Forel%C3%B8pig%20rapport%201-2012%20Kvikkleireskredet%20p%C3%A5%20Esp%20kl%2016.pdf> (Hentet: 23. august 2013).
- NVE. (2011). *Kvikkleirekart*. Tilgjengelig fra: <http://www.nve.no/no/Flom-og-skred/Farekartlegging/Kvikkleirekart/> (Hentet 5. mai 2014).
- NVE. (2009). *Elvis – elvenettverkdatabasen*. Tilgjengelig fra: <http://www.nve.no/no/Vann-og-vassdrag/databaser-og-karttjenester/Elvis---elvenettverkdatabasen/> (Hentet: 18. oktober 2013).
- Pandre, A. (2011). *Cluster Analysis: see it 1st*. Tilgjengelig fra: <http://apandre.wordpress.com/visible-data/cluster-analysis/> (Hentet: 12. februar 2014).
- Reitan, E. P. (2012). *Dette er kvikkleire og kvikkleirekart*. Tilgjengelig fra: <http://www.ngu.no/no/Aktuelt/2012/Dette-er-kvikkleire-og-kvikkleirekart/> (Hentet: 4. september 2013).
- Reitan, E. P. (2011). *Kvikkleireskred i Trondheim*. Tilgjengelig fra: <http://www.ngu.no/no/Aktuelt/2011/Kvikkleireskred-i-Trondheim/> (Hentet 27. januar 2014).
- Reite, A. J., Sveian, H. og Erichsen, E. (1999). Trondheim fra istid til nåtid – landskapshistorie og løsmasser. *Gråsteinen*, 5, s. 1-40.
- Rød, J. K., Bye, L., og Opach, T. (2013). Integrrert sårbarhetskartlegging for norske kommuner. I Bye, L., Lein, H., og Rød, J. K. (red.), *Mot en farligere fremtid?* (1. utg., s. 127-140) Trondheim, Norge: Akademia Forlag.
- Skei, K. (2009). *Nidelva og Gaula: Tilstandskartlegging av elvebredden innen Trondheim kommune* (NVE-rapport nr. 1/2009). Oslo: NVEs hustrykkeri.
- Spjeldnæs, N. (2012). *Kvikkleire*. I Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: <http://snl.no/kvikkleire> (Hentet: 18. november 2013).

- Statens Kartverk. (2014a). *Prosjekt nasjonal detaljert høydemodell*. Tilgjengelig fra: <http://www.statkart.no/Kart/Nasjonal-detaljert-hoydemodell/> (Hentet: 29. januar 2014).
- Statens Kartverk. (2014b). *Terrengmodeller – land*. Tilgjengelig fra: <http://www.kartverket.no/Kart/Kartdata/Terrengmodeller/Terrengmodell-10-meters-grid/> (Hentet: 18. februar 2014).
- Statens Kartverk. (2014c). *Oversikt over nedlastbare FKB-data i Trondheim kommune*. Tilgjengelig fra: <http://159.162.103.4/metadata/fkbprod.jsp?fylke=16&komm=1601&prod=FKB&Submit1=Vis+metadata> (Hentet: 11. mai 2014).
- Statens Kartverk. (2014d). *N50 Kartdata*. Tilgjengelig fra: <http://www.kartverket.no/Kart/Kartdata/Vektorkart/N50/> (Hentet: 20. januar 2014).
- Statens Kartverk. (2014e). *Nytt høydesystem NN2000*. Tilgjengelig fra: <http://www.kartverket.no/Kart/Geodatasamarbeid/Geovekst/Hoydegrunnlag/> (Hentet: 14. mars 2014).
- Statens Kartverk. (2013a). *FKB – Felles kartdatabase*. Tilgjengelig fra: <http://www.kartverket.no/Kart/Kartdata/Vektorkart/FKB/> (Hentet: 18. februar 2014).
- Statens Kartverk. (2013b). *FKB-Vann i Trondheim kommune*. Tilgjengelig fra: http://159.162.103.4/metadata/FKB40/32_1601Vann.xml (Hentet: 3 mai 2014).
- Su, J. og Bork, E. (2006). Influence of Vegetation, Slope, and Lidar Sampling Angle on DEM Accuracy. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(11), s. 1265-1274.
- Sulebak, J. R. (2007). *Landformer of prosesser*. Bergen, Norge: Fagbokforlaget.
- TauDEM. (2014). *Terrain Analysis Using Digital Elevation Models (TauDEM)*. Tilgjengelig fra: <http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/index.html> (Hentet: 5. mars 2014).

Tibshirani, R., Walther, G. og Hastie T. (2001). Estimating the number of clusters in a data set via the gap statistic. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, 63(2), s 411-423.

Trondheim kommune. (2014). *Nøkkeltall for Trondheim kommune*. Tilgjengelig fra: <http://www.trondheim.kommune.no/nokkeltall/> (Hentet 24. mars 2014).

Trondheim kommune. (2011). *R.1517 Buengveien 109 – Grunnundersøkelser Datarapport*. Tilgjengelig fra: www.trondheim.kommune.no/attachment/58384/R.1517_rev01.pdf (Hentet 9. mai 2014).

Vorren, T. O., Mangerud, J., Blikra, L. K., Nesje, A., og Sveian, H. (2007). Norge av i dag trer fram. I Ramberg I. B., Bryhni I., Nøttvedt A. (Red.), *Landet blir til*. (1. utg., s. 535-555). Trondheim, Norge: Norsk Geologisk Forening.

Wade, T. og Sommer, S. (2006). *A to Z GIS*. (1. utg.). California, USA: ESRI Press.