NVE

Jernbaneverket

Statens vegvesen

Sammenligning av modelleringsverktøy for norske snøskred

Naturfareprosjektet: Delprosjekt 7 Skred og flomsikring

107
2015

R A P P O R T

NIFS
NATURFARE
INFRASTRUKTUR - FLOM - SKRED

Rapport nr 107-2015
Sammenligning av modelleringsverktøy for norske snøskred

Utgitt av: Norges vassdrags- og energidirektorat

Redaktør:

Forfattere: Gunne Håland, Knut Inge Orset, Martine H. Frekhaug, Harald Norem

Trykk: NVEs hustrykkeri
Opplag: P.O.D
Forsidefoto: Fotograf Svein Helge Frækaland
ISBN 978-82-410-1159-7
ISSN 1501-2832

Sammendrag: Rapporten omhandler en statistisk behandling av 15 modellerte snøskred der utløpsdistanse, maksimal skredhastighet, og friksjonsforhold i utløpsområdet er vurdert og sammenlignet med observerte skred i Norge. Det er antatt at de fleste skredene har returperiode på 100 – 300 år. Målet med prosjektet er å se på hvilke(n) modell(er) som er best egnet for modellering av norske snøskred. Det har blitt anvendt både numeriske/dynamiske modeller og empiriske modeller i dette prosjektet.

Emneord: Modelleringsverktøy, snøskred, utløpsdistanse, skredhastighet, energitap, dimensjoneringsgrunnlag, kartlegging, skreddynamikk, sikringstiltak

Norges vassdrags- og energidirektorat
Middelthunsgate 29
Postboks 5091 Majorstua
0301 OSLO

Telefon: 22 95 95 95
Telefaks: 22 95 90 00
Internett: www.nve.no

2015

Forord

Denne rapporten omhandler en statistisk analyse av modellerte snøskred der resultatene blir vurdert og sammenlignet med observerte skred i Norge. Det har blitt anvendt både enkle empiriske modeller som baserer seg på topografiske forhold, og mer kompliserte dynamiske modeller som beregner massebevegelse fra start til stopp i skredbanen.

Målet med prosjektet er å se på hvilke(n) modell(er) som er best egnet for modellering av norske snøskred.

Hovedidéen bak prosjektet startet allerede i 2011 da Vegdirektoratet ønsket å vurdere hvilke modeller som var best egnet til skredfarekartlegging og dimensjonering av sikringstiltak. Prosjektet ble etter hvert en del av NIFS-prosjektet, som er et tverretatlig samarbeidsprosjekt mellom Statens vegvesen, NVE, og Jernbaneverket. Se: www.naturfare.no

Problemstillingene i denne rapporten har vært nyttig for å forstå hvordan modellene fungerer, og bør anvendes i norske skredløp. I tillegg har analysen synliggjort utfordringer og nye ideer for praktisk anvendelse av de ulike modelleringsverktøyene.

Rapporten og modelleringen er utført av fagpersoner i Geoteknikk – og skredseksjonen, Vegdirektoratet, som også har hatt hovedansvaret for gjennomføring av prosjektet. Vi ønsker å takke for gode innspill fra NVE og NGI tidlig i prosessen. I tillegg ønsker vi også å takke Jan Otto Larsen, Heidi Bjordal og Øyvind H. Skeie for gode innspill undervegs i prosjektet.

Trondheim og Molde, November 2015

Gunne Håland
Vegdirektoratet

Knut Inge Orset
Vegdirektoratet

Harald Norem
Vegdirektoratet

Martine H. Frekhaug
Vegdirektoratet

Sammendrag

Denne rapporten omhandler en statistisk behandling av 15 modellerte snøskred der utløpsdistanse, maksimal skredhastighet, og friksjonsforhold i utløpsområdet er vurdert og sammenlignet med observerte skred i Norge. Det er antatt at de fleste skredene har returperiode på 100 – 300 år. Prosjektet er en del av FoU programmet NIFS, som er et samarbeidsprosjekt mellom Statens vegvesen, Jernbaneverket og NVE.

Målet med prosjektet er å se på hvilke(n) modell(er) som er best egnet for modellering av norske snøskred. Fysisk riktighet er den faktoren det har blitt lagt størst vekt på. Følgende modeller ble anvendt i prosjektet: RAMMS (Christen, 2004) og Elba+ (Kleemayr, 2003) som er numeriske/dynamiske modeller, der massebevegelse blir beregnet gjennom hele skredbevegelsen. Videre ble alfa – beta modellen (Lied og Bakkehøi, 1981), energilinje modellen (Norem, 2010) og McClung modellen (McClung, 1990) anvendt. Disse modellene er empiriske og baserer seg utelukkende på topografiske forhold.

Punktene under viser aktuelle problemstillinger som ble utarbeidet for dette prosjektet:

1. Hvilken modell gir et mest korrekt bilde av utløpsdistanse og maksimal skredhastighet i norske skredløp? Her sammenlignes resultatene med utløpsdistanser og målte skredhastigheter fra virkelige skred.

2. I forbindelse med dimensjonering av sikringstiltak har beregning av skredhastighet i utløpsområdet en stor betydning for dimensjoneringsgrunnlaget. Hvilken modell simulerer mest realistisk oppbremsing og energitap i utløpsområdet? Det finnes erfaringsdata på dette fra tilbakeregning av målte skredhastigheter i naturen.

3. Gir de numeriske modellene som baserer seg på skreddynamikk bedre resultater enn de enklere empiriske modellene?

Resultatene for beregnet utløpsdistanse viser at de fleste modellene systematisk beregner noe for korte utløpdistanser med unntaket av alfa – beta modellen med standardavvik. De numeriske modellene, med objektive kriterier for bestemmelse av løsnevolum og friksjon, beregner utløpsdistanser mest nøyaktig. RAMMS med norsk justering av høydenivåer etter skoggrensen, kommer best ut av samtlige modeller. Energilinje modellen kommer best ut av de empiriske modellene.

De fleste modellene ser tilsynelatende ut til å beregne realistiske maksimale skredhastigheter, der ingen modeller beregner hastigheter høyrere enn generelle målinger i naturen. McClung modellen, som er en meget enkel modell for å beregne maksimale skredhastigheter, ser ut til å gi minst like realistiske og varierende hastigheter enn de numeriske modellene. Videre viser resultatene at de numeriske modellene generelt beregner mindre energitap i utløpsområdet sammenlignet med tilbakeregninger fra målte skred. RAMMS beregner minst energitap. Denne modellen bør derfor anvendes med forsiktighet for vurdering av dimensjonerende hastighet i utløpsområdet, spesielt i øvre del.

Resultatene viser at det er både styrker/svakheter med hver modell alt etter hvilket formål modellene skal brukes til. Det er derfor utfordrende å konkludere med hvilke(n) modell(er) som er best egnet for norske skred basert på fysisk riktighet. De observerte/målte verdiene av utløpsdistanse og energitap til observerte skred er ikke 100 % sikre, og vil i tillegg endre seg fra skredbane til skredbane. Konklusjonene i dette prosjektet må derfor anvendes med forsiktighet. Det anbefales at både kommersielle numeriske modeller og empiriske modeller benyttes sammen for å få bedre støttegrunnlag innen kartlegging og dimensjonering.

Innholdsfortegnelse

Liste over vedlegg: 1
1 Innledning 2
2 Organisering av prosjektet 3
3 Problemstilling 3
4 Skreddynamikk og modellering 4
4.1 Innledning 4
4.2 Generelt om numeriske modeller 4
4.3 Generelt om empiriske modeller 6
4.4 Skredhastighet og friksjon 6
4.5 Beskrivelse av modellene 8
5 Metode, feltobservasjoner og valg av parametere 13
5.1 Innledning 13
5.1.1 Definisjon av parametere 13
5.2 Grunnleggende ideer for valg av skredløp og statistisk behandling av observerte skred 14
5.3 Numerisk modellering 17
5.4 Empirisk modellering 22
5.5 Informasjon om skredløpene 23
6 Fremstilling av resultater 27
6.1 Utløpsdistanse 27
6.2 Maksimal hastighet og energitap(friksjon) i utløpsområdet 30
7 Oppsummering og diskusjon 32
8 Konklusjon 37
Referanser 39

Liste over vedlegg:

1. Numerisk simulering
2. Regresjonsanalyse
3. Eksempel på profil

1 Innledning

En viktig oppgave innen skredfarekartlegging er å fastsette grenser for hvor snøskred kan forekomme. Dette er nødvendig innenfor arealplanlegging av infrastruktur i skredutsatte områder. I tillegg er det viktig å vurdere skredhastigheter i forbindelse med planlegging og bygging av sikringstiltak.

Det finnes i dag mange modeller som beregner utløpsdistanse og hastighet til snøskred. Det blir brukt både enkle empiriske modeller (topografiske/statistiske modeller) og mer kompliserte dynamiske modeller der massebevegelsen beregnes fra start til stopp i skredbanen. De siste årene har det blitt utviklet flere 2-dimensjonale numeriske modeller som beregner skredhastighet, flytehøyde og bredde til snøskred over et 3 – dimensjonalt terreng.

Snøskred er en komplisert fysisk prosess der friksjon, hastighet, og skredvolum er i konstant endring når skredet beveger seg nedover skredbanen. Skreddynamikken påvirkes i stor grad av snøens egenskapene og topografiske forhold i skredbanen. De fleste dynamiske modellene baserer seg på generell hydraulisk teori som beskriver en væskestrøm med fasthetsegenskaper i en åpen kanal. Modellene som brukes mest i Norge er utviklet i Sveits og Østerrike, der snøens fysiske egenskaper og topografiske forhold er annerledes enn i Norge.

De empiriske modellene er 1 – dimensjonale og baserer seg på statistisk behandling av observerte skred. Disse modellene baserer seg utelukkende på topografiske forhold, og tar ikke klimatiske forhold i betraktning.

Det finnes få statistiske analyser av hvordan de numeriske modellene fungerer i norske skredløp. Det er også gjort forholdsvis få statistiske analyser der man sammenligner empiriske modeller opp mot numeriske modeller. Et problem ved bruk av de numeriske modellene er at endring av input parametere kan ha stor betydning for resultatene. Det er derfor lagt vekt på at disse parameterne skal være mest mulig basert på objektive kriterier.

Målet med dette prosjektet er å vurdere hvilke(n) modell(er) som er best egnet for modellering av norske snøskred. Fysisk riktighet er en viktig faktor det legges stor vekt på, men god brukervennlighet er også viktig.

Denne rapporten omhandler en statistisk behandling av 15 modellerte snøskred der utløpsdistanse, maksimal skredhastighet og friksjonsforhold i utløpsområdet, blir vurdert og sammenlignet med observerte skred i Norge. Prosjektet er en del av FoU programmet NIFS, som er et samarbeidsprosjekt mellom Statens vegvesen, Jernbaneverket og NVE. Rapporten og modelleringen er utført av fagpersoner internt i Vegdirektoratet, der Geoteknikk – og skredseksjonen har hatt hovedansvaret for gjennomføring av prosjektet.

Denne rapporten er en fagrapport som er rettet mot lesere med forhåndskunnskaper innen snøskreddynamikk, faresonekartlegging og dimensjonering av sikringstiltak.

2 Organisering av prosjektet

Planleggingen av dette prosjektet startet internt i Vegdirektoratet allerede i 2011. Samtidig startet FoU - programmet NIFS opp, og det ble bestemt at dette prosjektet skulle ligge under delprosjekt 7 skred – og flomsikring. I oppstarten ble det holdt møter med sentrale fagpersoner både i Statens vegvesen, NVE og NGI. Geoteknikk – og skredseksjonen i Vegdirektoratet har hatt hovedansvaret for gjennomføring av prosjektet. NVE har bidratt med faglig informasjon om flere skredløp.

NIFS – prosjektet har finansiert tidsbruk til alle involverte i dette arbeidet. Konklusjonene i dette prosjektet vil publiseres på naturfare.no, og resultatene vil derfor være offentlig tilgjengelige.

3 Problemstilling

Målet med dette prosjektet er å finne hvilke(n) modell(er)som er best egnet som modelleringsverktøy for norske skred. Fysisk riktighet til modellen vektlegges i størst grad, men også brukervennlighet og kostnader inngår i den totale vurderingen. Punktene under viser aktuelle problemstillinger som ble utarbeidet for dette prosjektet.

1. Hvilken modell gir et mest korrekt bilde av utløpsdistanse og maksimal skredhastighet i norske skredløp? Her sammenlignes resultatene med utløpsdistanser og målte skredhastigheter fra virkelige skred.

2. I forbindelse med dimensjonering av sikringstiltak har beregning av skredhastighet i utløpsområdet en stor betydning for dimensjoneringsgrunnlaget. Hvilken modell simulerer mest realistisk oppbremsing og energitap i utløpsområdet? Det finnes erfaringsdata på dette fra tilbakeregning av målte skredhastigheter i naturen.

3. Gir de numeriske modellene som baserer seg på skreddynamikk bedre resultater enn de enklere empiriske modellene?

En stor utfordring ved bruk av de numeriske modellene er at man kan endre på input parametere for å få modellskredet til å stoppe der man vil. Det er derfor ønskelig at fastsettingen av input parametere i modellene baserer seg mest mulig på objektive vurderinger slik at de i minst mulig grad er påvirket av fagpersonens skjønn. Dette for å kunne gjøre statistiske analyser av resultatene. Objektive kriterier kan være parametere som måles direkte i naturen eller på kart, eller formelverk/empiri som finnes i veiledninger. Objektive kriterier kan også være å følge en standard prosedyre ved bruk av klimadata. I denne analysen er det brukt standard friksjonsparametere som anbefales i modellene, og objektive kriterier for å bestemme størrelsen på løsneområdet.

For å kunne ha en formening om fysisk riktighet til modellene er det bestemt at et avvik på 50 - 100 meter (avhengig av lengde på skredbanen) mellom beregnet utløp og observert utløp er akseptabelt. Videre bør ikke modellene beregne maksimal skredhastighet eller energitap i utløpsområdet som avviker vesentlig fra målinger gjort i virkeligheten.

4 Skreddynamikk og modellering

4.1 Innledning

I forbindelse med arealplanlegging har tradisjonelt utløpsdistanse for snøskred blitt anslått ut fra historiske beretninger. I mange bygder er utløpsdistansen til historiske skred godt kjent blant folk. På 80 og 90 – tallet og frem til i dag har det blitt utviklet både empiriske og numeriske modeller som simulerer utløpsdistanse og hastighet til snøskred. I dag blir slike modeller i økende grad brukt som hjelpemiddel i arealplanlegging og dimensjonering av sikringstiltak. I dette prosjektet er det anvendt både numeriske og empiriske modeller for modellering av snøskred. Følgene modeller er benyttet:

- **RAMMS** (Numerisk, dynamisk). Utviklet i Sveits av SLF og WSL (Christen, 2004) Versjon 1.6.20 fra 2014.
- **Elba +** (Numerisk, dynamisk). Utviklet i Østerrike av University of Natural Resources and Applied Life Sciences (Kleemayr, 2003). Versjon 1.0 fra 2012.
- **Alfa – beta modellen** (Topografisk/statistisk modell. Empirisk modell, utviklet i Norge av NGI (Lied og Bakkehøi, 1980).
- **Energilinje modellen** (Topografisk/grafisk modell). Empirisk modell, utviklet i Norge av Statens vegvesen (Norem, 2010)
- **McClung modellen** (Topografisk/statistisk modell). Empirisk modell, utviklet i Canada (McClung, 1990)

RAMMS og Elba+ beregner både hastighet, utløpsdistanse og flytehøyde. Alfa- beta modellen beregner kun utløpsdistanse og energilinje modellen beregner både hastighet og utløpsdistanse. McClung modellen blir mest brukt til å beregne maksimal skredhastighet, men det er også mulig å beregne utløpsdistanser.

I delkapitlene under blir det gjort en generell gjennomgang for hvordan de numeriske og empiriske modellene er bygd opp og fungerer. Deretter blir det viktigste teoretiske grunnlaget som modellene baserer seg på, beskrevet i egne delavsnitt.

4.2 Generelt om numeriske modeller

De numeriske modellene baserer seg på generell hydraulisk teori der man anvender matematiske ligninger som beskriver en ikke-Newtonsk væske i en åpen kanal. Kompleksitet og reologi varierer fra modell til modell. De enkleste modellene tar utgangspunkt i skredets tyngdepunkt og beregner hastighet og utløpsdistanse langs ett gitt profil. Eksempel på dette er modellen til Voellmy (Voellmy,1955) og PCM modellen (Perla et al, 1980). Mer komplekse modeller tar hensyn til at skredet har en gitt lengde og bredde. Dette gjør at snøskredet beskrives som et deformerbart legeme der hastighet og flytehøyde varierer fra start til stopp i skredbanen. Slike modeller kalles gjerne for 2 – dimensjonale modeller, der NIS modellen, utviklet av NGI (Norem et al, 1987 og 1989) er et eksempel på en slik modell. I de siste årene har det blitt utviklet 2 –dimensjonale modeller som beregner hastighet og flytehøyde over et 3 – dimensjonalt terreng. Her beregner modellene sannsynlig skredbane ut i fra oppgitt topografi i form av en terrengmodell. Eksempler på slike modeller er RAMMS (Christen, 2004) og Elba+ (Kleemayr, 2003). Alle modellene er kommersielle og eventuelle lisenser må kjøpes.

Alle numeriske modeller er basert på at friksjonen som virker på skredlegemet er representert ved et hastighetsuavhengig og et hastighetsavhengig ledd. Dette kan utledes fra Newtons 2. lov, se ligning 1. Det første leddet representerer snøens friksjonsegenskaper, beskrevet som et Mohr – Coulomb materiale. Det siste leddet, $k(\frac{v}{h})^2$, baserer seg på hydrodynamikk eller fra teorier om partikkelkollisjon, og inngår også i NIS - modellen (Håndbok V138, 2014). Dette leddet fører til at flytehøyden har større innvirkning på den hastighetsavhengige friksjonen sammenlignet med Voellmy og PCM modellen.

$$\frac{Masse \cdot a}{enhetsareal} = \rho \cdot h \frac{dv}{dt} = P - (F_c + F_d) = \rho \cdot g \cdot h \sin\alpha - (c + \mu \cdot \rho \cdot g \cdot h \cos\alpha + k(\frac{v}{h})^2) \quad (1)$$

Der:
P = akselererende kraft pr. arealenhet(N/m^2)
F_c = friksjon uavhengig av hastigheten(N/m^2)
F_d = friksjon avhengig av hastigheten(N/m^2)
c = kohesjonen
μ = friksjonskoeffisienten
k = viskositeten
h = flytehøyde
$\frac{v}{h}$ = hastighetsgradienten(hastighet/flytehøyde)
ρ = snøens tetthet

Det er vanlig å se bort fra kohesjonen når man skal modellere skred av betydelig størrelse. Dette skyldes at partiklene i et fult utviklet tørt snøskred sjeldent er i langvarig kontakt med hverandre.

Dynamikken i snøskred er komplisert, der bevegelsen til dels kan beskrives som et fast stoff, væske og gass i bevegelse. Det finnes derfor flere åpenbare svakheter når man kun anvender hydraulisk baserte lover på snøskred. En av de største utfordringene er å kunne si noe om friksjonsegenskaper og flytehøyde til skredet. I tillegg inneholder de matematiske ligningene som benyttes for å beskrive skredbevegelsen flere ukjente ledd. I en væskestrøm vil for eksempel friksjonen fra skredets turbulens være avhengig av skredhastigheten, noe som i seg selv er en utfordring å bestemme. Kompleksiteten øker ytterligere da man i tillegg skal ta hensyn til at hastighet, skredvolum, vanninnhold og temperatur er i konstant endring når skredet beveger seg nedover skredbanen. Det er også en utfordring å implementere stoppekriterier for å modellere oppbremsingen til skredene i utløpsområdet. Når skredet starter oppbremsinger oppstår det kompliserte dynamiske prosesser som blant annet sintring, utveksling av varme og endring av snøens fysiske egenskaper.

Til nå tar numeriske modeller kun hensyn til de faste massene i tørre snøskred, og tar ikke i betraktning at snøens fysiske egenskaper endres underveis i skredløpet. Få modeller tar hensyn til erosjon/medrivning av masser underveis i skredløpet, og utfelling av masser i utløpsområdet. Usikkerhetene er store og det er vanskelig å finne objektive kriterier for hvordan slike parametere skal inngå. Det jobbes kontinuerlig med å utvikle modeller som på en enda bedre måte tar hensyn til dette.

4.3 Generelt om empiriske modeller

Empiriske modeller som er utviklet for snøskred er gjerne enkle betraktninger og matematiske sammenhenger som baserer seg på observerte skred. Alfa – beta modellen er en topografisk modell for å beregne utløpsdistansen til snøskred og ble introdusert av NGI i 1980. Den har senere blitt utvidet i andre land av blant annet Martinelli (1986) og McClung m.fl (1989). Modellen baserer seg på en enkel statistisk behandling av observerte skred med størst kjente rekkevidde. Den grunnleggende ideen med å registrere kjente skred var å se på hvilke terrengformasjoner som har størst betydning for utløpsdistansen (Lied og Bakkehøi, 2003). Kompliserte dynamiske prosesser som oppstår underveis i massebevegelsen blir derfor sett bort fra ved bruk av disse modellene.

Empiriske betraktninger av snøskred ved hjelp av energilinjer blir også brukt for vurdere skredhastighet og utløpsdistanse. Den grunnleggende ideen ved å bruke energilinjer er hentet fra hydrodynamikken. Dette fordi snøskred kan betraktes som en tynn væske, der det skjer en utveksling av energi når skredet beveger seg nedover skredbanen. Bruk av energilinjen baserer seg på Bernoullis ligning som sier at for tynne væskestrømninger i åpne kanaler er summen av potensiell energi, hastighetsenergi og energitap likt fra et sted til et annet (Håndbok V138, 2014). Summen av disse energitypene kan utrykkes ved hjelp av energihøyder langs skredbanen. Det er gjort flere undersøkelser der man har konstruert en energilinje basert på tilbakeregninger av målte hastigheter fra snøskred.

Det finnes også enkle empiriske modeller for å vurdere maksimale skredhastigheter for et gitt skredløp. McClung (1990) introduserte en enkel empirisk betraktning mellom total høydeforskjell i en skredbane og maksimal skredhastighet.

4.4 Skredhastighet og friksjon

I forbindelse med dimensjonering av sikringstiltak er det viktig å anslå skredhastigheten til det dimensjonerende skredet. Dette har betydning for valg av tiltak og hvordan disse bør dimensjoneres og utformes. I de fleste sammenhenger er det derfor mest interessant å vite noe om friksjonsforholdene og skredhastigheten i utløpsområdet der sikringstiltakene bygges. I naturen vil snøskred ofte ha en rask oppbremsing i utløpsområdet blant annet på grunn av sintring mellom snøkrystallene. Dette betyr at skredene kan ha en forholdsvis stor hastighet i starten av utløpsområdet, men vil avta raskt like før skredet når sitt maksimale utløp. Vanninnholdet i snøen påvirker også oppbremsingen. Våte snøskred har større kohesjon i skredmassene, og større friksjon mot underlaget i skredbanen. Dette fører til at våte snøskred generelt vil ha en raskere oppbremsing i utløpsområdet enn tørre skred.

Alle dynamiske modeller som er vanlig å bruke innen snøskred grupperer som nevnt friksjonskraften inn i et hastighetsuavhengig ledd og et ledd der friksjonen øker med skredhastigheten, se ligning 1. Ligningen viser at dersom summen av alle krefter som virker på skredet er lik 0, har skredet kommet opp i en maksimal skredhastighet, eller en terminalhastighet. Dersom all friksjon var uavhengig av hastigheten ville skredet aldri komme opp i en terminalhastighet, selv om skredbanen hadde vært uendelig lang. I naturen vil de fleste skred som beveger seg nedover en lang og bratt skredbane komme opp i en terminalhastighet. Ved å sette akselerasjonen og kohesjonen lik 0 kan man få et uttrykk som beskriver terminalhastigheten ut fra ligning 1, se ligning 2.

$$v_{term} = \sqrt{\frac{p \cdot g \cdot h^{1,5} \cdot (\sin\alpha - \mu \cos\alpha)}{k}} \qquad (2)$$

Dersom all friksjon hadde vært avhengig av hastigheten ville ingen skred ha stoppet før det hadde kommet ut i et flatt terreng. Imidlertid vet man at snøskred også kan stoppe i hellende terreng, noe som betyr at friksjonen som virker på et skred må bestå i ledd som både er avhengig og uavhengig av hastigheten (Håndbok V138, 2014).

Friksjonskoeffisienten μ i ligning 1 og 2 beskriver en friksjon som virker mellom skredlaget og et underlag som også består av snø. I følge håndbok V138 er det anbefalt at denne verdien varierer mellom 0,25 og 0,6 avhengig av vanninnholdet i snøen. Den laveste verdien representerer tørr snø, og den høyeste verdien for våt eller kram snø. Leddet $k(\frac{v}{h})^2$ i ligning 1 beskriver hastighetsavhengig friksjon, som får høy verdi dersom viskositetskoeffisienten k er høy, og når skredhastigheten er stor i forhold til skredtykkelsen. Dersom skredet består av tørr snø med små partikler mot bakken er viskositeten liten, og skredet får dermed stor hastighet. Tilbakeregninger viser at valg av μ har størst betydning for utløpsdistansen, mens leddet $k(\frac{v}{h})^2$ har størst betydning for terminalhastigheten.

Det er gjort en del målinger av maksimal skredhastighet til snøskred ved hjelp av radarmålinger i forbindelse med fullskala testforsøk. Resultatene viser at relativt store tørre skred får hastigheter på 40 – 70 m/s, mens våte skred kan komme opp i hastigheter på 30 – 40 m/s (Norem, 1996). Tørre skred kan i mange tilfeller komme opp i hastigheter over 40 m/s, selv i relativt slake skredbaner. Statens vegvesen har et radarvarslingsanlegg på Knutstugugrove i Lom som ble satt opp i 2014. Knutstugugrove er en forholdsvis bratt skredbane med en høydeforskjell på ca. 800 meter. Vinteren 2015 gikk det et forholdsvis stort skred som kom helt ned til vegen. Radaren målte en maksimal skredhastighet på 41 m/s (Krangnes, 2015). Modeller som beregner maksimal hastighet høyere enn 70 m/s er sannsynligvis ikke fysisk riktige.

Ved å betrakte helninger på energilinjer kan friksjonen og dermed energitapet som virker på skredet bestemmes, se figur 2. Det er som nevnt gjort flere undersøkelser, der man har konstruert energilinjer basert på tilbakeregninger av målte hastigheter fra større skred. Resultatene viser at i utløpsområdet har energilinjen ofte en tilnærmet konstant helning på 0,4:1 (21,8°), der store skred med spesielt langt utløp antas å ha en helning på 0,3:1 (Håndbok V138, 2014). En helning på 0,4:1 tilsvarer en total friksjon på 0,4, og inkluderer både den hastighetsuavhengige og hastighetsavhengig friksjonen. En energilinje med slak helning betyr at skredene har lave hastigheter i øvre del av utløpsområdet, og med en relativt sakte oppbremsing. En bratt energilinje betyr høyere hastigheter i øvre del av utløpsområdet, men en raskere oppbremsing. I den numeriske modelleringen betyr dette at selv om modellene beregner lik utløpdistanse, kan energitapet og oppbremsingen i utløpsområdet være forskjellig. En modell som beregner enten for slak eller for bratt helning av energilinjen i utløpsområdet, kan indikerer at modellen ikke er fysisk riktig.

4.5 Beskrivelse av modellene

4.5.1 RAMMS

RAMMS (Rapid Mass Movements Simulation) er et todimensjonalt numerisk simuleringsprogram som beregner massebevegelser over et tredimensjonalt terreng. Det er utviklet moduler for både snøskred, flomskred og steinsprang. RAMMS beregner flytehøyde, hastighet og stagnasjonstrykk i alle punkt fra start til stopp i skredbanen. Programmet er utviklet i Sveits av WSL- institutt for snø og skredforskning SLF. Snøskredmodulen til RAMMS er kalibrert fra fullskala skredforsøk gjort i Vallèe de la Sionne i Sveits (Bartelt et al, 2013).

RAMMS beskriver friksjonskreftene som virker på skredet ved hjelp av Voellmy-Salm modellen, som deler friksjonskreftene inn i to deler. Coulomb-friksjonen, μ, tar hensyn til friksjonen som oppstår på grunn av den faste delen av skredet og dominerer når skredet er nær ved å stoppe. Den hastighetsavhengige friksjonen, ξ, tar hensyn til friksjonen som oppstår som følger av de viskøse og turbulente kreftene. Denne friksjonen vil dominere når skredet har stor hastighet. Terrengruheten inngår også i parameteren ξ.

Friksjonslikningen for skredet er gitt i ligning 3 hvor S er den totale friksjonsmotstanden, ρ er tettheten til skredmassene, h er flytehøyden til skredet, g er gravitasjonskreftene, v er hastigheten, og α er helningen til skredbanen (Bartelt et al, 2013).

$$S = \mu phg \cos\alpha + \frac{pgv^2}{\xi,} \qquad (3)$$

Voellmy-Salm modellen kan beregne maksimalhastigheten i fronten av skredet, men kan ikke modellere utvikling av hastigheten over hele skredets lengde. Derfor bruker RAMMS også en modell som kalles for» *the random kinetic energy (RKE)*», som kobler kinetisk energi opp mot parameterne i Voellmy-Salm modellen. Det gir en forbedret resultat i forhold til beregning av fart, volumøkning og avsetting av skredmassene (Christen et al, 2010).

RAMMS bruker en historie-avhengig framgangsmåte for å regulere masseopptak og den forsinkelsen det tar å akselerere denne massen til skredhastigheten. Ved å anta at snødekket fragmenteres når det treffes av skredet vil farten av fragmenteringen skaleres med skredhastigheten, og blir da den effektive medrivnings-raten (Christen et al, 2010). Det er derfor mulig å legge inn lag som tar høyde for erosjon/medrivning av snø underveis i skredbevegelsen.

For å gjøre en simulering i RAMMS må følgende input parametere betraktes:

- Digital terrengmodell over skredområdet.
- Løsneområde og løsnehøyde. Det er mulig å oppgi flere løsneområder. Brukerveiledningen i RAMMS anbefaler at man angir et noe større løsneområdet enn forventet for å kompensere for medrivning/erosjon.
- Verdier for friksjonsparameterne. Det er mulig å endre på ξ og μ, men brukerveiledningen anbefaler å bruke de oppgitte standard parameterne. Det er også mulig å legge inn skog og endring i terrengruhet, som automatisk justerer friksjonsverdiene.

Stopp-kriteriet i RAMMS er basert på bevegelsesmengde, som er et produkt av masse og fart (Bartelt et al, 2013).

WSL jobber nå med å utvikle en modul i RAMMS som tar hensyn til at temperaturforholdene har innflytelse på granulære egenskaper til skredet. Dette gjør det mulig å simulere forskjeller i tetthet mellom de faste skredmassene og snøskyen. Dette vil kunne påvirke dimensjoneringen av trykkvirkninger på konstruksjoner. Den nye modulen gir brukeren muligheten til å angi temperaturen i snøen langs skredbanen, noe som gjør det mulig å simulere våte snøskred. Videre er Vollemy – reologien oppdatert ved at det er mulig å angi kohesjon i skredmassene. Dette vil blant annet påvirke stoppe – kriteriene i utløpsområdet. (Bühler et al, 2014).

Det ble valgt å se bort fra kohesjonen i dette prosjektet siden det finnes lite erfaringer med bruk av denne parameteren for tørre snøskred

4.5.2 Elba+

Elba+ ble utviklet allerede på 90 - tallet i Østerrike. Elba står for Energy line based Avalanche Model og tar også utgangspunktet i Voellmy - reologien. Elba+ er en todimensjonalt numerisk modell som simulerer skredbevegelsen over et tredimensjonalt terreng, slik som RAMMS. Modellen er videreutviklet fra en 1-dimensjonal energilinjemodell. Programmet beregner hastighet, flytehøyde og stagnasjonstrykk for alle punkt i skredbanen. I Elba+ har brukeren mulighet til å endre på en rekke parametere, men brukerveiledningen anbefaler å bruke standardparameterne, som er kalibrert etter ca. 150 skredhendelser i Østerrike og Sveits.

Friksjonskoeffisientene μ og ξ har også i Elba+ en stor betydning for beregning av utløpsdistanse og hastighet. Det er likevel ikke nødvendig å velge disse parameterne ut fra skredstørrelse og gjentaksintervall som i RAMMS. Kalibrering av friksjonsparameterne er gjort ut fra de nevnte 150 skredhendelsene og det er definert ulike μ - verdier for løsneområde, skredbane og utløpsområde. Viskositetskonstanten ξ, blir beregnet for hvert simuleringssteg og vil variere som resultat av terrengform (også omtalt som roughness length), og snømengde (Volk og Kleemayr, 2000). For alpelandene er det antatt at friksjonsparameterne er gyldige for skred med et gjentaksintervall på 100-300 år. En lignende kalibrering er ikke gjennomført for nordiske forhold.

Elba+ har også mulighet til å legge inn lag med skog eller annen terrengruhet, samt lag for medrivning av snø (entrainment).

Elba+ er utviklet som et tillegg til Esri sitt kartverktøy ArcMap. Inntegning av løsneområder, valg av terrengmodell og parametersetting gjøres i ArcMap. Selve simuleringen skjer i et frittstående program, mens resultatene hentes inn igjen i ArcMap.

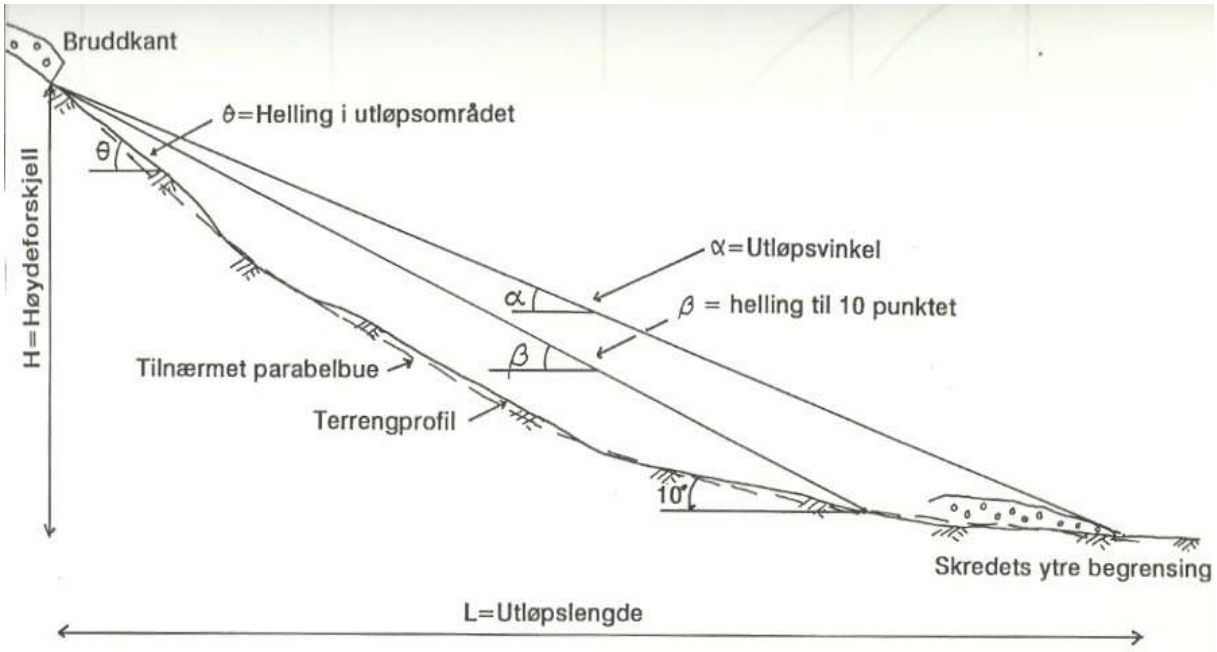
4.5.3 Alfa – beta modellen

NGI (Lied og Bakkehøi,1980) var de første som presenterte en ren topografisk modell for å beregne utløpsdistansen til snøskred. Den grunnleggende ideen for utvikling av alfa - beta modellen var at topografiske forhold i skredbanen har stor innvirkning på utløpsdistansen. Modellen er en matematisk regresjonsligning fra statistisk behandling av 206 skred med kjent utløpsdistanse. I modellen beskrives utløpsdistansen til skredene med en α – vinkel, som er vinkelen mellom skredets bruddkant og ytterste avsetting, se figur 1. En statistisk behandling viste at det var en klar sammenheng mellom utløpsvinkelen og gjennomsnittlig helning til skredbanen. Gjennomsnittlig helningen av skredbanen blir uttrykt ved vinkelen, β, som

beskriver helningen mellom skredets bruddkant og det punktet i skredbanen som har 10º helning, se figur 1. I den statistiske behandlingen ble forholdet mellom disse to vinklene funnet til å være:

$$\alpha = 0{,}96 \cdot \beta - 1{,}4 \qquad (4)$$

Vinklene blir oppgitt i grader, der standardavviket, SD = 2,3°.



Figur 1. Prinsippskisse av alfa - beta modellen.

Ligning 4 viser at det er en klar sammenheng mellom utløpsvinkelen og gjennomsnittlig helningen i skredbanen. I teorien vil slake skredbaner gi lengst rekkevidde fordi skredet beveger seg langs en kurvatur som er akkurat bratt nok til å opprettholde bevegelsen (Lied og Kristensen, 2003). I slike skredbaner blir luftmotstanden og friksjonstapet på grunn av turbulens minimal, noe som gir bedre bevaring av energi og dermed lengre utløp. En annen årsak til at man får lengre utløp i slake skredbaner er at det ofte ligger mer snø både i skredløpet og løsneområdet (Lied og Kristensen, 2003). Dette fører til at skredets løsnevolum blir større sammenlignet med bratte løsneområder der det ligger mindre snø. Når skredet er på veg nedover skredløpet kan det vokse flere ganger i størrelse dersom det ligger mye snø i skredløpet. Store skredvolum fører gjerne til større hastighet og lengre utløp, noe som gir mindre utløpsvinkler (Lied og Kristensen, 2003). I bratte skredbaner vil energitapet være større, noe som gir kortere utløpdistanse og stor utløpsvinkel.

4.5.4 Energilinje modellen

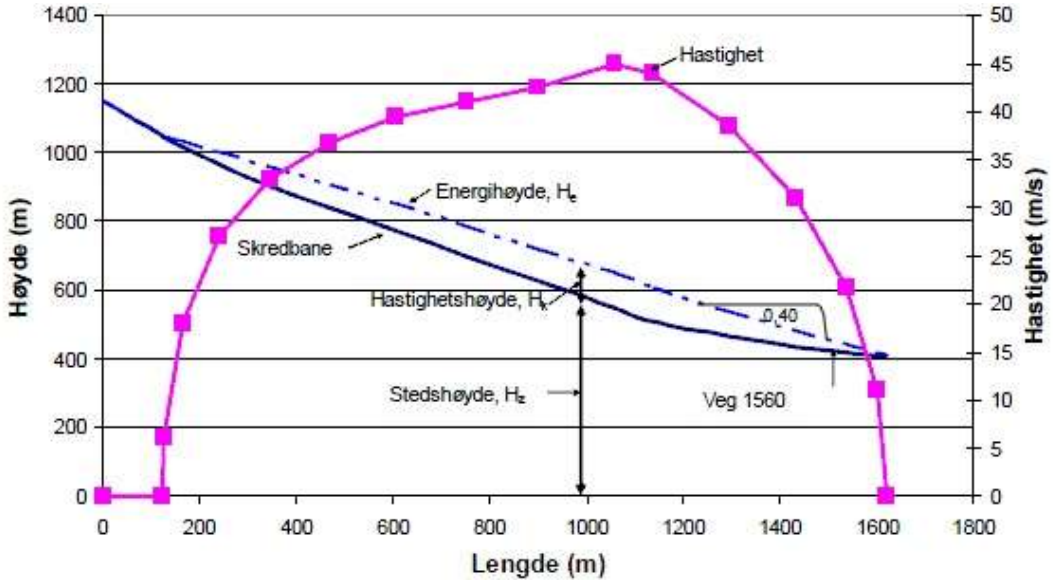
Energibetraktninger av snøskred ved å bruke energilinjer ble først introdusert av Körner i 1980. I 2010 ble bruk av energilinjer, for å både bestemme hastighet og utløpsdistanse til snøskred, publisert av Norem. Modellen er til nå forholdsvis lite utbredt i Norge, men blir noe brukt i Statens vegvesen. Hovedideene for utvikling av modellen er hentet fra erfaringer med NIS – modellen og analyse av data fra Ryggfonn, som er NGIs forskningsstasjon på Strynefjellet. Det grunnleggende prinsippet for utvikling av modellen var å ta med noe av kunnskapen om dynamiske egenskaper til skred, men at de topografiske forholdene skal ha størst innvirkning på resultatene.

Snøskred kan som nevnt betraktes som en tynn væske i en åpen kanal der det skjer en utveksling av energi. Når skredet utløses har det i starten en lav hastighet med stor andel potensiell energi. Etter hvert som skredet akselerer og får større hastighet går energien over til hastighetsenergi og varme, der varmen representerer energitapet. Når skredet har stoppet opp er både den potensielle og hastighetsenergien lik 0, og all potensiell energi har gått over til varme. Ved å bruke Bernoullis ligning kan man beskrive snøskredbevegelsen i energihøyder.

Energihøyden kan uttrykkes slik:

$$H_e = H_z + \frac{v^2}{2g} + \text{tapsledd} \qquad (5)$$

Der H_z = den potensielle energien som tilsvarer stedshøyden i alle punkt langs skredbanen, $\frac{v^2}{2g}$ = hastighetshøyden, der hastighetsenergien varierer med kvadratet av skredhastigheten, og tapsleddet representerer varmen. Figur 2 under viser eksempel på en energilinje som blir konstruert fra beregnede hastigheter med NIS - modellen.



Figur 2. Beregnet skredhastighet og energilinje for Nakkefonna i Møre og Romsdal (Håndbok V138).

Helningen til energilinjen viser hvor fort energitapet skjer. Når energilinjen er bratt tilsier dette at energitapet pr. lengdeenhet er stor, noe som gir korte utløpsdistanse og store utløpsvinkler. Forløpet på energilinjen i figur 2 viser at helningen i starten av skredbevegelsen er noe slakere enn for resten av skredbanen. Dette betyr at energitapet i første del av skredbevegelsen er forholdsvis liten da skredet er i en akselererende fase. Lenger ned i den bratte delen av skredløpet har energilinja tilnærmet samme helning som skredløpet. Dette indikerer at terminalhastigheten er nådd. I utløpsområdet har energilinjen en tilnærmet konstant helning på 0,4:1.

Energilinje modellen kan brukes på to måter i forbindelse med beregning av skredhastighet og utløpsdistanse:

1) Bestemme skredhastigheten i et gitt punkt i utløpsområdet basert på observert utløpsdistanse, se figur 3.
2) Bestemme utløpsdistanse ved å bruke terminalhastigheten, se figur 3.

Ved metode 1 utføres følgene prosedyre:

Det trekkes en linje med helning på 0,4:1 (eller 0,35:1 for skred med lengre returperioder) fra observert/antatt utløp og innover i utløpsområdet. Deretter måles avstanden mellom skredprofilet og energilinjen, H_k i et bestemt punkt. Skredhastigheten bestemmes ved hjelp av formel: $v = \sqrt{2gH_k}$.

Dersom hastighetshøyden overstiger hastighetshøyden beregnet med formelen for terminalhastighet, bør man ikke benytte denne metoden.

Ved metode 2 utføres følgene prosedyre:

Det beregnes en hastighetshøyde, $H_k = (\frac{v^2}{2g})$ i 20° punktet i skredbanen. Deretter trekkes det en linje med helning på 0,4:1 (1:0,35) til linjen tangerer skredbaneprofilet, se figur 3. Tangeringspunktet definerer skredets utløp. Terminalhastigheten beregnes etter følgene formel:

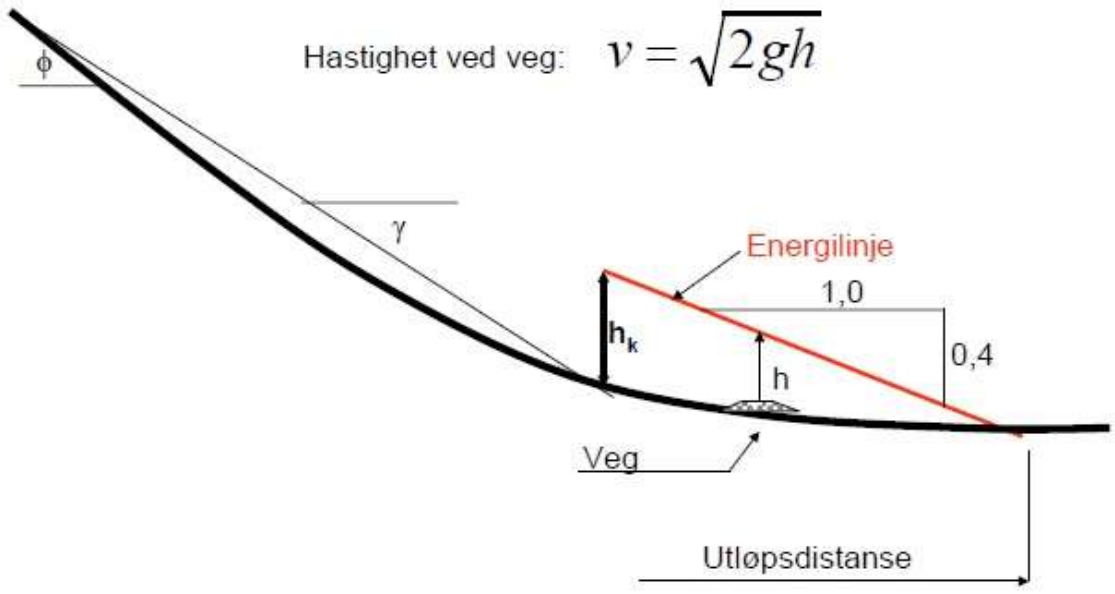
$$v_{term} = \sqrt{3000 \cdot {h_\theta}^{1,5} \cdot (\sin\gamma - 0{,}31\cos\gamma)} \qquad (6)$$

Der:

3000 er en valgt gjennomsnittverdi for pg/k, se ligning 2.

γ = helningen fra 20 - graders punktet og til bruddkanten i løsneområdet

h_θ = skredets flytehøyde = $1{,}4 \cdot \frac{\sin 40 - 0{,}2\cos 40}{\sin\theta - 0{,}2\cos\theta}$ (7)



Figur 3. Prosedyre for å beregne skredhastigheter og utløp ved bruk av energilinjemodellen (Håndbok V138).

4.5.5 McClung modellen

I Canada er det utviklet en enkel empirisk modell for å bergene maksimal skredhastighet i et gitt skredløp. Den grunnleggende tanken er at den totale friksjonen i snøskred ikke er avhengig av hastigheten. Modellen er en enkel formel som er utledet fra Newtons 2. lov og uttrykkes slik:

$$V_m = 1{,}8\sqrt{H} \tag{8}$$

Der $V_m$er maksimal hastighet og H er den vertikale høydeforskjellen i skredbanen. Denne empiriske sammenhengen tar kun hensyn til at det er den totale høydeforskjellen i skredbanen som har betydning for maksimal skredhastighet. Modellen er utviklet fra kjente utløpsdistanser til skred i Rogers Pass, British Columbia (McClung, 1990).

5 Metode, feltobservasjoner og valg av parametere

5.1 Innledning

Kravene til fastlagte skredgrenser er for alle NIFS - etatene basert på returperiode, men kravene varierer fra etat til etat. NVE bruker returperioder på 300 – 1000 år for hytter og boliger etter teknisk byggeforskrift (TEK 10), mens Statens vegvesen opererer med returperiode på 2 - 100 år etter risikoakseptkriterier som kun gjelder for veger.

Dette kapitelet tar for seg grunnleggende teori og vurderinger for:

- Valg av skredløp og statistikk behandling av observerte skred
- Bruk av objektive kriterier for vurdering av løsnevolum og friksjonsparametere i de numeriske modellene
- Bruk av terrengdata i de empiriske modellene

I Tabell 2 blir det gjort en beskrivelse av topografi og historisk informasjon om utløpsdistansen til de utvalgte skredløpene.

5.1.1 Definisjon av parametere:

Følgene parameter har blitt brukt i dette kapitlet:

γ = gj.snitt helning fra 20^o punktet i skredbanen til bruddkant
β = gj.snitt helning av skredbanen (fra 10^o punktet i skredbanen til bruddkant)
h_L= løsnehøyde
θ = gjennomsnittlig helning i løsneområdet
h = flaktykkelse,
H = vertikal høydeforskjell av skredbanen
L= horisontal lengde av skredbanen
V = skredvolum

5.2 Grunnleggende ideer for valg av skredløp og statistisk behandling av observerte skred

Forutsetninger for å få utløst store naturlige skred oppstår i forbindelse med at man har liten fasthet i et potensielt glidelag med en nødvendig mengde snø over dette laget. En slik kombinasjon vil ikke opptre hver vinter i et skredområde. En grunnleggende tanke er derfor at for lange returperioder vil den mest ugunstige situasjonen for å få utløst store naturlige skred oppstå i et bestemt skredområdet (Bakkehøi og Norem, 1994). Klimatiske forhold vil derfor ha mindre betydning for størrelsen på skred med lange returperioder i et gitt skredløp.

Det er gjort flere statistiske undersøkelser som viser at skredstørrelsen er avhengig av returperiode. Fitzharris (1981) gjennomførte blant annet en slik analyse i Rogers pass i Canada for perioden 1909 – 1977. I denne undersøkelsen fant han ut at skredstørrelsen øker vesentlig for returperioder over 10 år. I tillegg ble det også antatt at korrelasjonen mellom returperiode og skredstørrelse avtar for returperioder høyere enn 100 – 200 år. Dette har sin naturlig forklaring ved at i løpet av lange returperioder vil det oppstå store skred som vil ligge nær sitt maksimale utløp i et gitt skredløp.

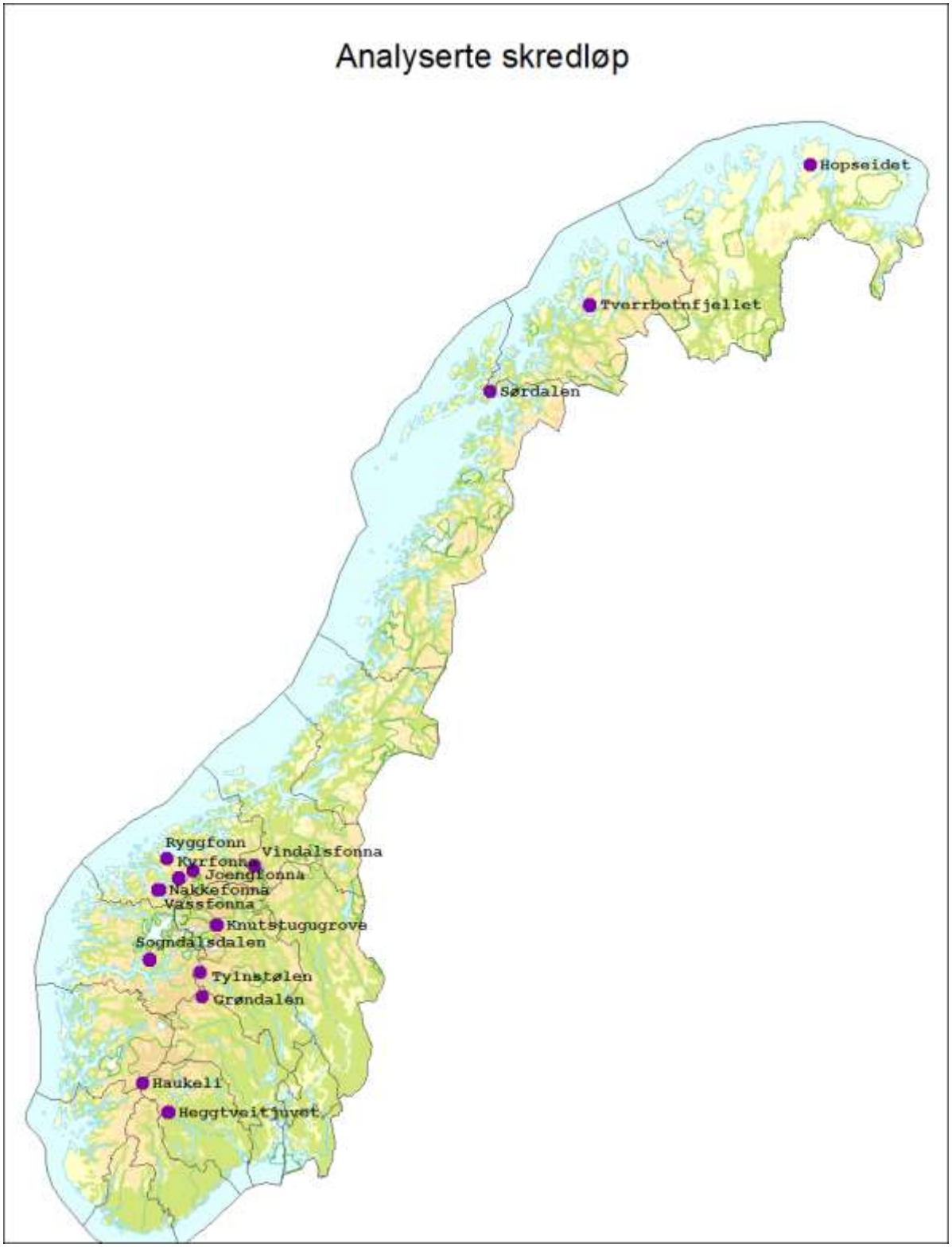
Skredstørrelse vil variere fra skredløp til skredløp, der variasjonen er avhengig av lokalt klima, og topografiske forhold i skredbanen. I Norge har vi flere tydelige klimatiske forskjeller med kystklima(maritimt) som strekker seg fra kyst – og fjordstrøkene fra Vestlandet og opp til Nordland og Troms. Vi har høyfjellsklima i de sentrale fjellområder i Sør – Norge og i Nord – Norge, og kontinentalklima som representerer indre deler av Østlandet, Troms og Finnmark. En må derfor forvente at det er systematiske forskjeller i forholdet mellom skredstørrelse og snøens fysiske egenskaper fra et klimaområdet til et annet. Dette kan gi noen utfordringer når man skal vurdere statistiske trender for utløpsdistanser i hele landet. Det antas at disse forskjellene har mindre betydning for skred med lange returperioder (Bakkehøi og Norem, 1994).

Følgene informasjon/kriterier var viktig for valg av de ulike skredløpene som ble brukt i dette prosjektet:

- Skredløpene bør være fordelt i ulike klimasoner i Norge (kontinental, maritimt, og høyfjellsklima).
- De observerte skredene bør ha returperioder på 100 – 300 år, og bør ligge nær sitt maksimale utløp.
- Det må finnes rimelig nøyaktig dokumentasjon om utløpsdistanse til skredene.
- Det bør finnes rimelig nøyaktig informasjon om løsneområdet.
- Hindringer som elver eller vann i utløpsområdet må ikke ha avgjørende betydning for utløpsdistansen.

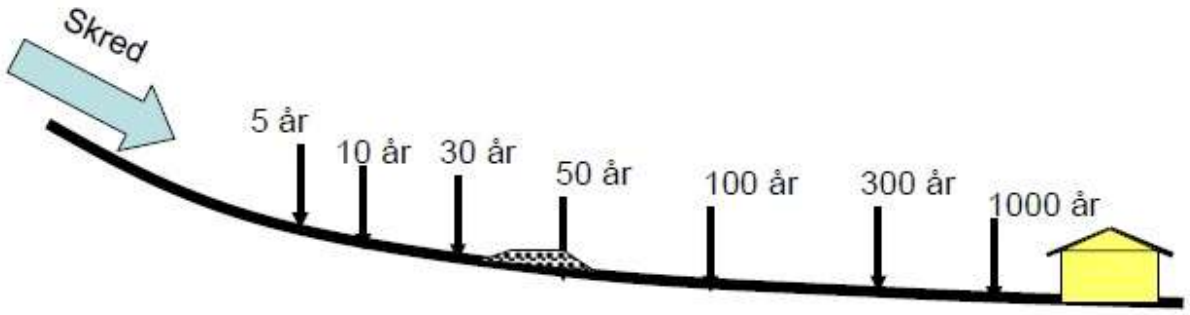
Det ble valgt ut 15 skredløp der 8 antas å ligge i maritimt klima, 5 i kontinentalt klima og 2 i høyfjellsklima, se figur 4 og tabell 2. De fleste skredløpene ligger på Nord-Vestlandet, men også andre skredutsatte områdene i Norge er tatt med. Den innsamlende dokumentasjonen kan derfor gi indikasjoner på hvordan utløpsdistansen varierer fra klimaområde til klimaområde, men man skal være forsiktig med å trekke for raske konklusjoner, særlig med et så lite datagrunnlag som man har hatt i dette prosjektet.

Noen av de valgte skredløpene har elv eller mindre vann som ligger i den ytterste utløpssonen for skredet. Det ble antatt at disse faktorene har underordnet betydning for utløpsdistansen på grunn av at vannet eller elven har vært islagt med et tykt lag med snø over.



Figur 4. Oversiktskart med lokalisering av simulerte skredløp.

Figur 5 viser at utløpdistansen blir kortere ved lavere returperioder i et skredløp. Denne reduksjonen vil variere med klimatiske og topografiske forhold i hver skredbane. For Statens vegvesen er det ønskelig at det utvikles modeller som også er tilpasset lavere returperioder. Dette er en utfordring fordi ved lave returperioder har klimatiske faktorer større betydning for utløpsdistansen. Det ble derfor valgt å ta utgangspunktet i store, sjeldne skred med returperioder på 100 - 300 år i dette prosjektet.



Figur 5. Prinsippskisse som viser forholdet mellom returperiode og utløpsdistanser (Håndbok V138).

For å få gode statistiske trender mellom observert skred og modellert skred er det viktig med betydelige datamengder. Likevel ble kun 15 skredløp brukt i dette prosjektet, da denne type analyse er meget tidkrevende.

Det er antatt at de fleste registrerte skredene i dette prosjektet har en returperiode på 100 – 300 år, men dette er utfordrende å anslå. Man er avhengig av nøyaktig historisk informasjon om utløpsdistanse til skredene, noe som kan være av varierende kvalitet. I denne analysen er det tatt hensyn til de faste massene i skredet, eller ytterkant av vesentlig skredavsetning. Snøskyene i tørre skred går gjerne en del lenger enn de faste massene i skredet, noe som kan gi feil registering av utløpsdistanse. Det er derfor knyttet usikkerhet til definert returperiode og informasjon om utløpsdistanse. De dataene som inngår i skredregistreringen representerer det største kjente skredet i hvert skredløp. Tabell 2 viser informasjon om utløpsdistanse og løsneområdet til observerte skred. Informasjonen er hentet både fra lokale og interne fagpersoner i NIFS – etatene som har jobbet med disse skredløpene gjennom oppdragsvirksomhet.

Utløpsdistansen blir vanligst tallfestet ved å angi en vinkel mellom skredets ytterste avsetning i utløpsområdet og til bruddkanten i løsneområdet. En annen metode er å angi horisontal utløpsdistanse fra bruddkant og til skredets ytterste avsetting, se figur 1. I dette prosjektet har begge metodene blitt benyttet, men kun horisontal utløpsdistanse har blitt benyttet i den statistiske behandlingen. Et avvik på 50 - 100 meter mellom beregnet utløp og observert utløp blir vurdert som akseptabelt for en modell. Et større avvik vil være mer akseptabelt i lange skredbaner enn korte skredbaner.

Skredbaneprofilet for skredløpene ble tegnet inn i et digitalt kart i Novapoint versjon 18.30, som er prosjekteringsverktøy for vegplanleggere i Statens vegvesen. Dette programmet er godt egnet for å få et nøyaktige profil og vertikalsnitt av skredbanen. Skredbaneprofilet ble tegnet fra øvre bruddkant i løsneområdet, langs hovedløpet og videre ut i utløpsområdet. Både observert utløpdistanse og beregnet utløpsdistanse fra alle modellene ble bestemt ut fra det samme profilet. Vedlegg 3 viser et eksempel på et profil fra Haukeli.

5.3 Numerisk modellering

De numeriske modellene er som nevnt dynamiske og er utviklet på grunnlag av generelle materialmodeller som beskriver bevegelse av granulære materialer. I RAMMS og Elba+ er det derfor løsnevolum og friksjonsparametere som har mest innvirkning på utløpsdistanse og skredhastighet. Det er disse parameterne som stort sett er mulig å endre i programmene og det er ønskelig at de bestemmes mest mulig etter objektive kriterier.

Denne seksjonen beskriver teori og antagelser av metodikk for objektiv vurdering av løsnevolum og friksjonsparametere for den numeriske simuleringen. Oppløsning og kvalitet på terrengmodell kan også ha betydning for resultatene og nevnes også i dette delkapitlet.

5.3.1 Løsneområdet

Tilgjengelig informasjon om løsneområdet var en viktig forutsetning for valg av skredløp. For de fleste skredløpene finnes det relativt nøyaktige beskrivelser hvor skredene vanligvis pleier å løsne. Det hersker langt større usikkerheter rundt dimensjoner av flakets tykkelse, lengde og bredde. I de dynamiske modellene har disse parameterne stor betydning for det totale løsnevolumet, som igjen har betydning for utløpsdistanse og skredhastighet. For å kunne gjøre statistiske analyser av utløpsdistansen er det viktig at disse parameterne i størst mulig grad er bestemt etter objektive kriterier. I RAMMS anbefales det, som tidligere nevnt, å angi et større løsneområdet enn naturlig for å kompensere for erosjon/medrivning av snø. Dette har blitt sett bort fra i dette prosjektet.

Det har blitt brukt identiske løsneområder i RAMMS og Elba+.

Skredlagets tykkelse:
Når et skred løsner er det som oftest et resultat av at skjærspenningen fra de drivende kreftene i snøflaket er høyere en skjærfastheten som er de stabiliserende kreftene i snøen. I de fleste tilfellene vil derfor bruddkantens høyde være avhengig av terrenghelningen i løsneområdet (Bakkehøi og Norem, 1994). I brattere løsneområder trengs det mindre snø over det kritiske laget for å få en ustabil situasjon sammenlignet med tilsvarende snøforhold i slakere områder.

Snøens fasthetsegenskaper kan derfor betraktes etter prinsipper utviklet innen geoteknikk, se ligning 9;

$$\tau = c + \sigma_y \tan \emptyset \tag{9}$$

Der:
τ = materialets skjærfasthet
c = kohejson
σ_y = spenning normalt på skjærspenningsretningen
$\emptyset$ = friksjonsvinkel for materialet

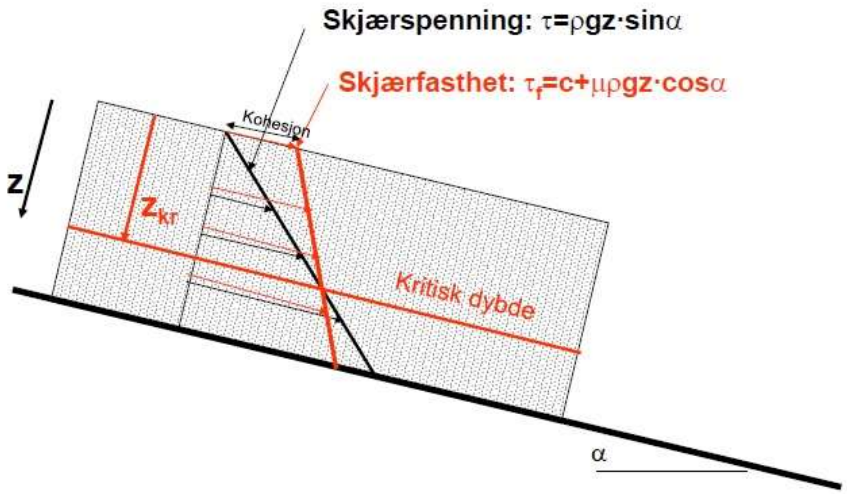
Hvis man betrakter at et snøflak ligger i et terreng med helning α , vil det virke opptredende skjærspenning τ_{opp}, normalt på glidelaget. Denne spenningen, ved dybde z i snødekket, kan utrykkes ved:

$$\tau_{opp} = pgz \sin \alpha \quad (N/m^2) \tag{10}$$

Der:
p = snøens tetthet (kg/m^3)
g = tyngdens akselerasjon
z = snødybde normalt på bakken

Når et skred utløses er det forutsatt at den opptredende skjærspenningen (τ_{opp}), overstiger skjærfastheten til det svakeste laget i snødekket. Figur 6 viser variasjon av kritisk dybde z_{kr} til et flak representert ved opptredende skjærspenning og skjærfasthet. Ligning 11 viser at kritisk dybde til skredlaget er representert i punktet hvor disse to linjene skjærer hverandre (Håndbok V138, 2014).

$$z_{kr} = \frac{c}{pg(\sin \alpha - \mu \cos \alpha)} \tag{11}$$



Figur 6. Viser kritisk dybde til et snøflak i et homogent snødekke representert ved skjærspenninger og skjærfasthet (Håndbok V138, 2014).

Dersom det forutsettes at snøens skjærfasthet er konstant over hele glidelaget, vil kritisk dybde for å få utløst skred være sterkt avhengig av terrenghelningen.

I de sveitsiske retningslinjene legger man større vekt på klimadata når flaktykkelse skal bestemmes. De sveitsiske normalene følger en forholdsvis omfattende prosedyre for å bestemme flaktykkelse. Metoden ble introdusert av Salm et al, i 1990, og innebærer følgende vurderinger:

- Akkumulert snø de 3 siste døgnene som en funksjon av returperiode
- Høydekorreksjon av akkumulerte snømengder
- Pålagring av at vindtransportert snø
- Korreksjon basert på helningsvinkel i løsneområdet

Denne prosedyren krever at man må analysere klimadata. Dette er både tidkrevende å innhente, samtidig som det finnes svært få værstasjoner med ønskede målerverdier i nærheten av de analyserte skredløpene. I tillegg inneholder prosedyren flere trinn med formler og avlesninger av graf som kan øke sjansene for å gjøre feil. Det ble derfor vurdert at denne fremgangsmåten ble for omfattende i dette prosjektet. Metoden vil kunne egne seg bedre for et enkelt skredområdet, dersom man har tilgang på representativ klimadata.

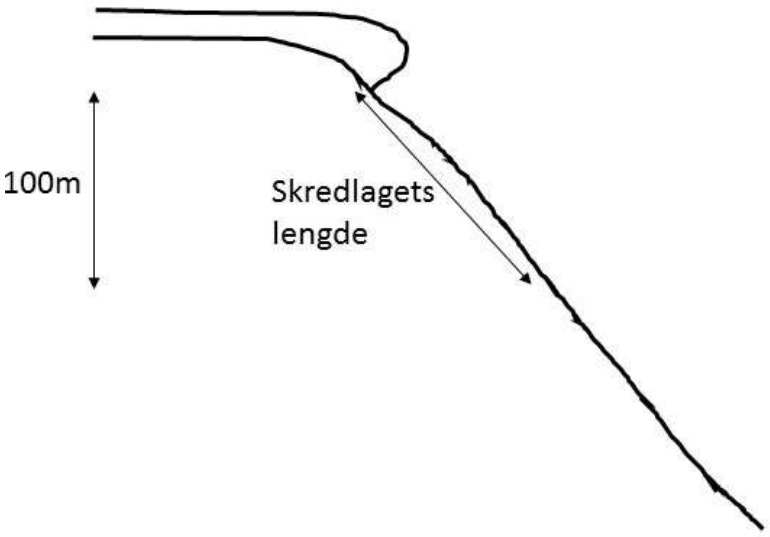
Beregning av flaktykkelse i dette prosjektet ble det derfor gjort ved å bruke formel 11. Det det ble brukt en kohesjon på 2kN/m^2 og en friksjonskoeffisient på 0,2, som er i tråd med utvikling av sveitsiske normaler for bruddfastheten til snø (Salm et al, 1990). Den eneste ukjente parameteren for beregning av flaktykkelse blir dermed terrenghelningen.

I dette tilfelle ble den gjennomsnittlige terrenghelningen for hele løsneområdet funnet ved kartvertøyet ArcGis.

Skredlagets lengde

Lengden av flaket defineres som avstanden mellom bakre og fremre bruddkant. Dette er en parameter som er nesten umulig å bestemme fordi det bare er bakre bruddkant som blir stående igjen etter det har gått et skred. NGI har gjort noen vurderinger basert på praktiske erfaringer for å komme frem til en objektiv verdi for denne parameteren (Bakkehøi og Norem, 1994). Det ble antatt at lengden av skredlaget er avhengig av snødybdefordelingen og helningen til løsneområdet i øvre del av skredløpet. Det ble antatt av Norem (1978) at det meste av den vindtransporterte snøen blir felt ut i et ca. 100 m høyt område under det nivået hvor de store virvelsystemene dannes. Dette er en meget forenklet antagelse, men viser at mesteparten av den vindtransporterte snøen legger seg i et belte i leområdet nær toppen av fjellet.

Lengde av skredlaget som ble angitt i RAMMS og Elba+ ble definert ved å anta at skredlagets lengde har en vertikal høydeforskjell på 100 meter, se figur 7. I tilfeller der terrenghelningen blir slakere enn 30 grader før den vertikale høydeforskjellen oppnås, blir skredlagets lengde noe kortere. Dette skjer gjerne i korte skredbaner der den totale høydeforskjellen mellom bruddkant og utløpsområdet er lav. I denne analysen var det 4 skredløp som fikk en noe kortere lengde på skredlaget som en følge av dette.



Figur 7. Definisjon av skredlagets lengde.

Skredlagets bredde
Utbredelse eller bredde av skredlaget er den eneste parameteren som må vurderes subjektiv etter fagpersonens egne antagelser. Dette er utfordrende å bestemme på grunn av at bruddforplantningen i et svak lag varierer med egenskapene til snødekket og lokale topografiske forhold. I dette prosjektet ble utbredelse av skredlaget best mulig vurdert ut ifra terrenganalyse og erfaringer med bruddforplantning fra andre observerte store skred.

NB! Bredde av flaket ble bestemt før simuleringen startet. Det ble ikke gjort noen korrigeringer av løsneområdet i ettertid av simuleringen for at resultatene skulle samsvare bedre med observerte utløpsdistanser.

Tabell 1 viser input parametere for løsneområdet som ble brukt for RAMMS og Elba +. Legg merke til at modellene beregner ulikt volum selv med samme løsneareal og flaktykkelse. Årsaken til dette er at RAMMS kalkulerer volumet ut fra arealet på det hellende terrenget og ikke det horisontale arealet som ELBA+ bruker. I følge erfarne brukere av begge programmene i Østerrike skal ikke dette påvirke den totale massen som inngår i selve simuleringen (Granig, pers kom).

Tabell 1. Input av skredvolum i RAMMS og Elba+.

Modell	**RAMMS**			**Elba+**	
Skredløp	h (meter)	V(m^3)	Kategori	h (meter)	V(m^3)
Haukeli	1,6	46542	Medium	1,6	39652
Vindalsfonna	1,7	57795	Medium	1,7	49950
Nakkefonna	1,6	78103	Large	1,6	68170
Tverrbotnfjellet	1,6	173259	Large	1,6	140480
Joengfonna	1,4	49577	Medium	1,4	38640
Ryggfonn	1,5	58674	Medium	1,5	46800
Tyinstølen	1,7	46544	Medium	1,7	37230
Vassfonna	1,8	139593	Large	1,8	115740
Hopseidet	1,4	8574	Small	1,4	6860
Grøndalen	1,6	78921	Large	1,6	64120
Sørdalen	1,6	25943	Medium	1,6	20640
Knutstugugrove	1,2	49400	Medium	1,2	35280
Kyrfonna	1,6	91269	Large	1,6	74400
Sogndalsdalen	1,6	76454	Large	1,6	61500
Heggtveitjuvet	1,5	83236	Large	1,5	65100

5.3.2 Friksjonsparametere og terrengmodell

I de numeriske modellene kan man gjøre egne vurderinger av friksjonsparametere eller bruke standard friksjonsparametere som automatisk blir beregnet ut fra topografi i terrengmodellen. I RAMMS ligger μ – verdiene mellom 0,14 – 0,47 og ξ varierer mellom 900 og 4000. Terrengforhold, høydenivå, skredvolum og valg av returperiode påvirker friksjonsverdiene i RAMMS. Verdiene baserer seg på tilbakeregninger fra målte skred i Vallèe de la Sionne i Sveits. Friksjonsparameterne som brukes i Elba+ er fastsatt etter tilbakeregning av kjente skredhendelser, hovedsakelig i Sveits og Østerrike fra vinteren 1999. i Elba+ er det definert ulike μ - verdier for skredbanen, der løsneområdet har μ = 0,25, hovedskredløpet har μ = 0,155 og utløpsområdet har μ = 0,25. Parameteren ξ varierer i tid og rom og er avhengig av terrengform, snømengde og hastighet og kan ikke angis manuelt i Elba+. Det er anslått at størrelsen på skredene som ble brukt til å bestemme standard friksjonsverdiene i Elba+ har returperiode på 100-300 år. Det er ikke utført egne tilpasninger for friksjonsverdiene etter nordiske forhold.

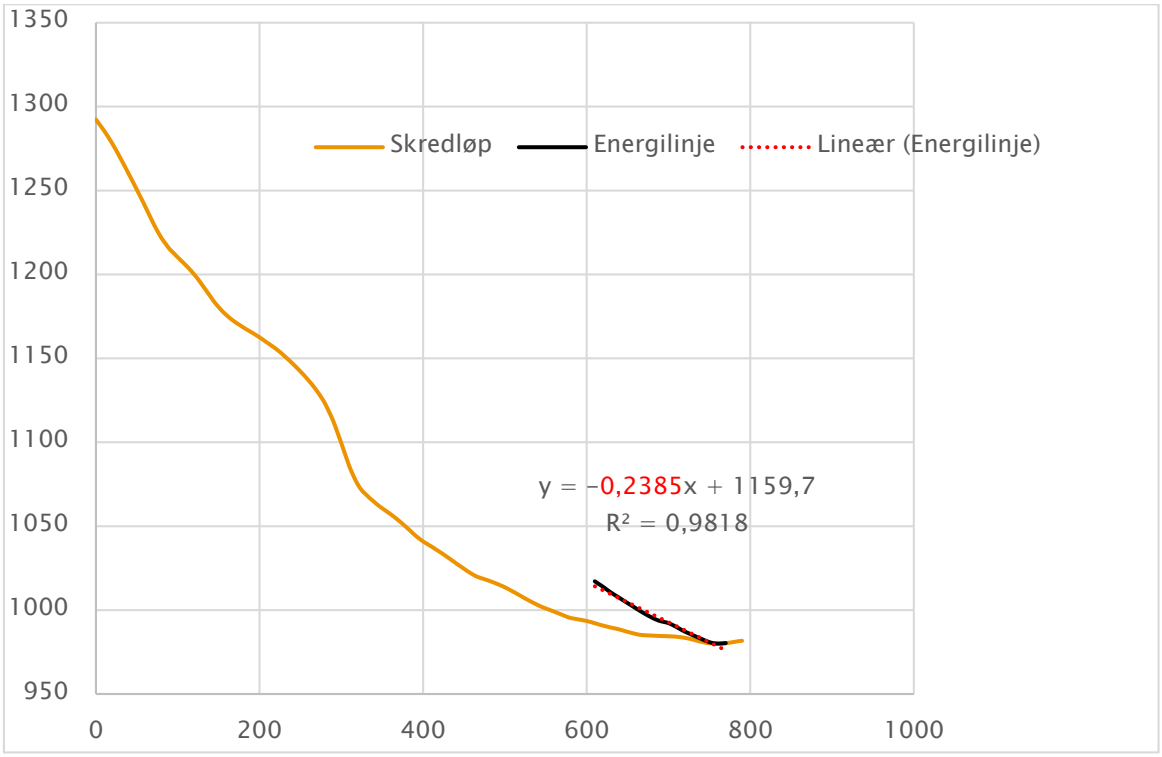
Terrengmodell med dårlig oppløsning kan gi unøyaktige beregninger av både friksjonsparametere og massebevegelse. I dette prosjektet er det brukt grid – oppløsning på 10 meter i terrengmodellene. I brukerveiledningen anbefales det å bruke oppløsninger på 10 meter, 5 meter og 2 meter, men erfaringer viser at man gjerne får noe bedre resultater med en oppløsning på enten 5 meter eller 2 meter (Workshop Davos, 2012). Selv om terrengmodellen har en gridoppløsning på 10 m, kan høydedataene spesielt fra høyfjellet være betydelig dårligere enn det grid-oppløsningen indikerer.

I RAMMS har man muligheten til å justere friksjonsparametere etter høydenivåer i den gitte skredbanen. Bakgrunnen for denne muligheten er å ta høyde for klimatiske forskjeller fra et skredområdet til et annet. I RAMMS brukes det standard høydeverdier (1500 m/1000 m) som er tilpasset klima og høydenivå på skredløpene i Sveits. I Norge vil man kunne ha tørrere og mer snø lenger ned i skredbanen på grunn av et generelt kaldere klima. På grunn av store klimatiske forskjeller i Norge, kan det være utfordrende å bestemme faste verdier som gjelder for hele landet. Det ble valgt å utføre to simuleringer med RAMMS i prosjektet, der den ene simuleringen ble kjørt med standard verdiene (1500 m/1000 m) og den andre med en norsk justering av høydenivåene etter skoggrensen. Det ble valgt å ta utgangspunktet i skoggrensen fordi denne påvirkes av lokalt klima og er samtidig et objektivt kriterie. Det ble fortsatt brukt et intervall på 500 meter mellom høydenivåene. I Elba+ er det ikke mulig å justere friksjonsparameterne etter høydenivå, men ved å justere μ-verdiene manuelt kan man få samme høydejustering som RAMMS.

I RAMMS og Elba+ er det er mulig å legge inn partier med skog i skredløpet for å ta hensyn til bremseeffekten skogen har på skredene. De fleste skredløpene som ble brukt i dette prosjektet har lite skog i selve skredbanen. Det ble derfor ikke tatt hensyn til skog i simuleringene. Det ble heller ikke tatt hensyn til erosjon/medrivning i simuleringen.

En av problemstillingene i dette prosjektet var å se hvordan de numeriske modellene beregner oppbremsingen i utløpsområdet. Det ble konstruert energilinjer ved å bruke hastigheter fra de numeriske modellene. Hastighetsprofilet ble trukket langs de maksimale hastighetene i utløpsområdet til RAMMS og Elba+. Deretter ble profilene eksportert til Excel der det ble laget en lineær trendlinje av energilinjen for de nederste 200 meterne i utløpsområdet, se figur 8. Helningen på trendlinjen representerer energitapet og dermed oppbremsingen i utløpsområdet.

Basert på håndbok V138 ble det vurdert at beregnende helninger bør ligge i intervallet 0,3 – 0,4:1 for å kunne være et akseptabelt resultat.



Figur 8. Eksempel på energilinje i utløpsområdet, konstruert i Excel. I dette tilfelle er helningen på ca. 0,24.

5.4 Empirisk modellering

Ved bruk av empiriske modeller har nøyaktigheten av innmålt terrengdata stor betydning for resultatene. Bestemmelse av 10º og 20º punktene og inntegning av utløpsvinklene i skredprofilet er eksempler på parametere som må være nøyaktig for at de empiriske modellene skal kunne brukes.

Det ble foretatt en analyse der ulike metoder for bestemmelse av 10º og 20º punktene i skredbanen ble vurdert. Det henvises til notat 15/234402-001 for mer informasjon om analysen. Følgende metoder ble vurdert:

- **Bruk av vertikalprofil i Novapoint:** Skredbaneprofilet tegnes på et digitalt kart i Novapoint. I vertikalsnittet trekker man en linje med helning på 10º og 20º og ser hvor den tangerer skredbaneprofilet.
- **Helningskart i ArcGIS**: Her bruker man helningskart for å finne frem til 10º og 20º punktene langs skredbaneprofilet.
- **Excel:** NGI har tidligere vist at det ikke er vesentlige forskjeller mellom matematiske parabelbaner og naturlig skredbane i Norge. Den matematiske parabelbanen kan uttrykkes på formen: $y = ax^2 + bx + c$.
  Ved å bruke for eksempel Excel kan man legge inn det naturlige skredbaneprofilet og finne en matematisk polygonligning som best mulig beskriver denne skredbanens form. Ved hjelp denne ligningen kan 10º og 20º punktene enkelt bestemmes.

I analysen ble utløpsdistanse beregnet med alfa – beta modellen og energilinje modellen, der 10º og 20º punktene ble funnet ved de tre metodene. Resultatene viste at ArcGIS og

Novapoint er de metodene for å finne 10^o og 20^o punktene som gir de nøyaktigste utløpsdistansene sammenlignet med observert utløp. I dette prosjektet ble derfor Novapoint anvendt for bruk av de empiriske modellene.

Enkelte skredbaner som ble brukt i denne analysen har en brå vinkelendring mellom skredløpet og utløpsområdet. Her ble 10^o og 20^o punktene satt i det samme punktet. Skredprofilet i Novapoint ble som tidligere nevnt også brukt til å bestemme horisontal utløpsdistanser og utløpsvinkler for de numeriske modellene, se vedlegg 3.

Beregning av utløpsdistanse med alfa – beta modellen påvirkes i stor grad av om man tar med standardavviket eller ikke. I dette prosjektet ble alle skredløpene modellert med og uten standardavvik. Ved bruk av energilinje modellen påvirkes resultatene om man bruker energilinjer med helninger på henholdsvis 0,4:1 eller 0,35:1. Det ble også valgt å modellere alle skredløpene med begge helningene.

5.5 Informasjon om skredløpene

Tabell 2 under viser den viktigste informasjonen om skredløpene som har betydning for input parametere i modellene, og beregnet utløpsdistanse. Her blir topografiske forhold og historisk informasjon om observert utløp for hvert skredløp beskrevet. Det henvises til kap 5.1.1 for definisjon av de topografiske parameterne.

Tabell 2. Informasjon om skredløpene.

Skredløp	**Fylke/Kommune**	**Klimasone**	**Topografi**	**Historisk informasjon**
1. Haukeli	Telemark/Vinje	Høyfjell Hele skredløpet ligger over tregrensen	h_L= 1290 H = 303 θ = 37 β = 26 γ = 29	Det gikk et stort skred over veg og nesten på andre siden av vannet i 1943. Skredet ble observert av en vegvokter. Da han fortale hvor langt skredet hadde gått, var det ingen som trodde han. Det gikk også et skred over vegen på 90-tallet. Det er antatt at løsneområdet ligger ca. mellom kote 1200 og 1300, men dette er noe usikkert. Informant: Harald Norem
2. Vindalsfonna	Sør - Trøndelag/Oppdal	Kontinental Skoggrensen ligger på ca. 800 moh.	h_L = 1300 H = 713 θ = 35 β = 28 γ = 30	Det gikk et stort skred på 60 – tallet som hadde et utløp til dagens kraftlinje. Den ene stolpen ble noe bøyd, noe som kan observeres den dag i dag. Løsneområdet ligger ca. mellom kote 1200 og 1300. Informant: lokal i Storlidalen
3. Nakkefonna	Møre og Romsdal/Stranda	Maritimt Skoggrensen ligger på ca. 600 moh.	h_L= 1240 H = 843 θ = 36 β = 26 γ = 27	Et større skred gikk senest i 2011, men stoppet i veggrøft. 4 skred over veg er registrert mellom 1975-1996, maks bredde på veg er 300 m. Det finnes ikke annen detaljert beskrivelse enn at det har gått til elva. På 40 - tallet gikk skredet betydelig større mot sør enn antydet på simuleringene.

				Løsneområdet ligger sannsynligvis ca. mellom kote 1250 og 1150. Informant Harald Norem
4. Tverrbotnfjellet	Troms/Tromsø	Maritimt Skoggrensen ligger på ca. 300 moh	h_L= 1170 H = 1074 θ = 35,5 β = 31 γ = 32	Det har gått skred to ganger over veg siden 1980. Et svært stort løsneområde er lokalisert ca. mellom kote 1170 og 1070. Nøyaktig størrelse er noe usikkert. Informant: Ole André Helgaas
5. Joengfonna	Møre og Romsdal/Rauma	Maritimt Skoggrensen ligger på ca. 500 moh	h_L= 1200 H = 1117 θ = 39 β = 38 γ = 40	Her går det skred som sjelden påvirker infrastruktur, men i 1967 og 68 gikk skredet over toglinja med en bredde på flere hundre meter. Snøskyen kan gi siktproblemer også på veg på motsatt side av dalen. Det er observert tynne avsetninger samt rester av skog på veg flere ganger. Skredløpet ligger i et dypt karakteristisk gjel, noe som kan samle opp store snømengder. Løsneområdet er lokalisert ca. mellom kote 1200 og 1100, men nøyaktig størrelse er noe usikkert. Informant: Rapport T-161A, SVV)
6. Ryggfonn	Møre og Romsdal/Vestnes	Maritimt Skoggrensen ligger på ca. 600 moh	h_L= 980 H = 797 θ = 37,5 β = 32 γ = 32	Det er hyppig skredfrekvens i dette skredløpet, men skredene går sjelden over veg. Største registrere utbredelse er fra 2000 der skredet sperret vegen i en bredde på 20 m. Her gikk de faste masser så vidt over elva. Løsneområdet er lokalisert i et område mellom kote 1000 og 900. Informant: Kåre Ingolf Karlson
7. Tyinstølen	Oppland/Vang	Høyfjell Hele skredløpet ligger over tregrense	h_L= 1255 H = 152 θ = 35 β = 29 γ = 33	I 2008 gikk det et stort skred som traff bebyggelsen ved Tyinstølen. Det har aldri tidligere vært registrert skred med et så langt utløp her. Løsneområdet er godt dokumentert på bilder. Det var meget ustabile forhold i snøen kombinert med store snømengder i terrenget. Løsneområdet er lokalisert ca. mellom kote 1260 og 1180. Informant: Svein Helge Frækaland
8. Vassfonna	Møre og Romsdal/Stranda	Maritimt	h_L= 1387 H = 960	Det går skred flere ganger årlig i dette skredløpet. Det er registrert 5 skred på veg i

		Skoggrensen ligger på ca. 600 moh.	θ = 33 β = 30 γ = 32	perioden 1976-2007. Maksimal skredutbredelse ble registrert i januar 2007. Her lå det opptil 7 meter med snø på vegen i en bredde på 300 meter. Løsneområdet antas å ligge mellom kote 1400 og 1300 med svært stort areal. Informant: Nils Bjørdal.
9. Hopseidet	Finnmark/Gamvik	Maritimt (Finnmarkskysten) Hele skredløpet ligger over skoggrensen	h_L= 260 H = 196 θ = 39 β = 36 γ = 36	De fleste skredene som går i dette skredløpet er forholdvis små, men det er registrert større skred som har passert elva med en bredde på 50 – 100 meter. Det er antatt at løsneområdet er lokalisert ca. mellom kote 260 og 210. Informant: NGI rapport nr 82458-2, 1984.
10.Grøndalen/Møre kvamdalen	Buskerud/Hemsedal	Kontinentalt Skoggrensen ligger på ca. 1000 moh.	h_L= 1360 H = 505 θ = 35,5 β = 25 γ = 31	Det gikk et stort skred for ca. 35 år siden i dette skredløpet. Skredet var noe fuktig og det var liten spredning av massene i utløpsområdet. Det lå ca. 3 meter med snø på vegen. Skredet stoppet opp like under hyttene ved fuglehaugen. Informant: Markus Landrø og lokal brøytesjåfør i Grøndalen.
11. Sørdalen	Troms/Kvæfjord	Maritimt Skoggrensen ligger på ca. 200 moh	h_L= 400 H = 300 θ = 36,5 β = 30 γ = 31	I forbindelse med bygging av E10 (Lofastprosjektet) ble det observert et større skred som stoppet opp like ved elven på andre siden av vegen. Løsneområdet er lokalisert mellom kote 400 og 300. Informant: Jan Otto Larsen.
12. Knutstugugrove	Oppland/Lom	Kontinentalt Skoggrensen ligger på ca. 800 moh	h_L= 1140 H = 780 θ = 44 β = 29 γ = 34	I 1943 gikk det et stort skred som nesten hadde et utløp ned til elva. Skredet dekket vegen i en bredde på nesten 300 meter. Det antas at skredet løsner mellom kote 1150 og 1050. Bruddkanten kan bre seg et stykke østover fra bekken. Informant: skredsikringsplan i Region øst 2012, og lokale.
13. Kyrfonna	Møre og Romsdal/Nordal	Maritimt	h_L= 1000 H = 815	Det går ofte skred i dette skredløpet, men disse påvirker sjeldent infrastruktur. De faste massene til et stort skred

		Skoggrensen ligger på ca. 600 moh	θ = 35,5 β = 33 γ = 33	stoppet ca. 70 meter fra veg i 2010. Det ble observert 10 cm med snø og kvist ved denne hendelsen. Det har gått skred 2 ganger siden 1975 med samme størrelse. Det antas at skredet løsner mellom kote 900 og 1000. Informant: Skredsikringsplan M&R 2008.
14. Sogndalsdalen	Sogn – og Fjordane/Sogndal	Kontinentalt Skoggrensen ligger på ca. 800 moh	h_L= 1000 H = 618 θ = 36 β = 31 γ = 33	Januar 2015 gikk det et stort skred etter en periode med mye nedbør og sterk vind. Skredet kom på veg to steder like sør for Selseng. Mektigheten av skredmassene var forholdsvis liten på veg, noe som tyder på at vegen danner ytterkant av vesentlig skredavsetning. Det er ikke registrert skred på veg her før. Løsneområdet antas å ligge mellom kote 900 og 1000. Informant: Jens Tveit.
15. Heggtveitjuvet	Telemark/Tokke	Kontinentalt Skoggrensen ligger på ca. 900 moh	h_L= 1050 H = 595 θ = 38 β = 23 γ = 28	Vinteren 2014 gikk det et stort skred etter en periode med en god del nedbør og vind. Skredet stoppet ca. 100 meter ut på Byrtevatn som var isbelagt og dekket med snø. Skredet hadde en mektighet på ca. 3 meter på vegen. Det har gått flere store skred i dette løpet før, men denne hendelsen er en av de største som er registrert. Utløpsdistansen og løsneområdet er godt dokumentert på bilder. Løsneområdet ligger ca. mellom kote 1050 og 950. Informant: Audun Langelid og Stein Aasheim.

6 Fremstilling av resultater

I dette kapitelet blir det gjort en fremstilling av resultater for beregnede utløpsdistanser, maksimale skredhastigheter, og energitap(friksjonsforhold) i utløpsområdet.

6.1 Utløpsdistanse

Tabell 3 viser resultater fra beregning av utløpsdistanser med de ulike modellene. Det ble tatt med resultater fra alfa – beta modellen med og uten standardavviket, og energilinjemodellen med energilinjer på 0,4:1 og 0,35 :1, i den statistiske behandlingen. Resultatene fra RAMMS og Elba+ er med standard friksjonsverdier og objektive kriterier for valg av løsnevolum.

Vedlegg 2 viser resultater fra en regresjonsanalyse mellom observert og beregnet utløpsdistanse. Verdien R er et uttrykk for korrelasjonen mellom disse verdiene og kan derfor si noe om hvilken modell som gjennomsnittlig beregner mest nøyaktige utløpsdistanser.

Tabell 3. Viser observert utløpsdistanse, og beregnede utløpsdistanser med de ulike modellene.

	Observert		**Alfa – beta modell m/SD(u/SD)**		**RAMMS (Standard parametere)**		**Elba+ (Standard parametere)**		**Energilinje 0,4:1(0,35:1)**	
Skredløp	**α**	X_L	**α**	X_L	**α**	X_L	**α**	X_L	**α**	X_L
Haukeli	16	1060	21(24)	760(660)	20	840	21	760	22(21)	726(770)
Vindalsfonna	25	1530	23(25,5)	1657(1490)	26	1440	26	1440	26(25)	1440(1523)
Nakkefonna	24	1893	21(23,5)	2098(1934)	24	1910	24	1857	24,5(24)	1792(1856)
Tverrbotnfjellet	25	2260	26(28)	2201(1995)	28	2000	28	1990	29(28)	1980(2025)
Joengfonna	31	1870	33(35)	1730(1538)	36	1490	36	1490	33(32)	1707(1788)
Ryggfonn	29	1480	27(29,5)	1586(1458)	30	1420	30	1420	28(27,5)	1520(1552)
Tyinstølen	16	538	24(26,5)	317(278)	16	528	17,5	478	17(15,5)	502(557)
Vassfonna	26,5	1910	25(27,5)	2010(1863)	28	1805	29	1760	28(27)	1840(1876)
Hopseidet	30	341	31(33)	352(290)	26	386	26	386	21,5(21,5)	421(428)
Grøndalen	19,5	1295	20,5(22,5)	1275(1206)	20,5	1260	22,5	1210	24(23)	1104(1188)
Sørdalen	21,5	760	25(27,5)	629(558)	24,5	650	26	600	23(21,5)	706(757)
Knutstugugrove	27	1540	24(26,5)	1752(1572)	27,5	1485	28,5	1425	28(27)	1443(1534)
Kyrfonna	29,5	1450	28(30,5)	1520(1410)	29	1450	30,5	1400	29(28,5)	1466(1488)
Sogndalsdalen	28,5	1135	26(28,5)	1265(1150)	29	1110	30,5	1030	27(26)	1216(1259)
Heggtveitjuvet	20,5	1600	18,5(20,5)	1770(1574)	20,5	1600	21	1533	24(22,5)	1186(1357)

$\mathbf{R^2}_{Elba+}$ = **0,958**. $Gj.snitt_{X_{L\,beregnet} - X_{L\,observert}}$ = **- 125 meter**

$\mathbf{R^2}_{RAMMS\ m/standard\ friksjon}$ = **0,955.** $Gj.snitt_{X_{L\,beregnet} - X_{L\,observert}}$ = **- 86 meter**

$\mathbf{R^2}_{energilinje(0{,}35:1)}$= **0,947**. $Gj.snitt_{X_{L\,beregnet} - X_{L\,observert}}$ = **- 47 meter**

$\mathbf{R^2}_{Alfa-beta\ m/standaravvik}$= **0,944**. $Gj.snitt_{X_{L\,beregnet} - X_{L\,observert}}$ = **17 meter**

$\mathbf{R^2}_{Alfa-beta\ u/standaravvik}$= **0,939**. $Gj.snitt_{X_{L\,beregnet} - X_{L\,observert}}$ = **-112 meter**

$\mathbf{R^2}_{energilinje(0{,}4:1)}$= **0,926**. $Gj.snitt_{X_{L\,beregnet} - X_{L\,observert}}$ = **- 108 meter**

Resultatene viser at RAMMS og Elba+ har ca. like stor korrelasjon og kommer best ut av samtlige modeller i denne analysen. Energilinje modellen (0,35:1) og alfa – beta modellen m/SD kommer best ut av de empiriske modellene. Energilinje modellen (0,4:1) har minst korrelasjon med observerte utløpsdistanser.

Tabell 4 under viser resultatene av simuleringen gjort i RAMMS med norsk justering av høydeintervallene etter skoggrensen. Det ble valgt å sette limit 1: 500 m og limit 2:0 m i de tilfellene hele skredløpet lå over skoggrensen.

Tabell 4. Viser observert utløpsdistanse og beregnet utløpsdistanse med norsk justering av høydenivåene i RAMMS.

	Observert		**RAMMS (Standard parametere)**		**Høydenivå**	**RAMMS (Norsk justering)**		**Endring(meter)**
Skredløp	**α**	X_L	**α**	X_L	**Lim1/Lim2**	**α**	X_L	
Haukeli	16	1060	20	840	500/0	18	900	+ 60
Vindalsfonna	25	1530	26	1440	1050/650	26	1477	+37
Nakkefonna	24	1893	24	1910	850/350	23	1952	+42
Tverrbotnfjellet	25	2260	28	2000	550/50	27,5	2070	+70
Joengfonna	31	1870	36	1490	750/250	35,5	1505	+15
Ryggfonn	29	1480	30	1420	850/350	30	1420	0
Tyinstølen	16	538	16	528	500/0	16	545	+ 15
Vassfonna	26,5	1910	28	1805	850/350	28	1830	+25
Hopseidet	30	341	26	386	500/0	24,5	396	+10
Grøndalen	19,5	1295	20,5	1260	1250/750	19,5	1288	+28
Sørdalen	21,5	760	24,5	650	650/150	24	670	+20
Knutstugugrove	27	1540	27,5	1485	1050/550	27,5	1485	0
Kyrfonna	29	1450	29	1450	850/350	29	1450	0
Sogndalsdalen	28,5	1135	29	1110	1050/550	28,5	1130	+20
Heggtveitjuvet	20,5	1600	20,5	1600	1150/650	20,5	1600	0

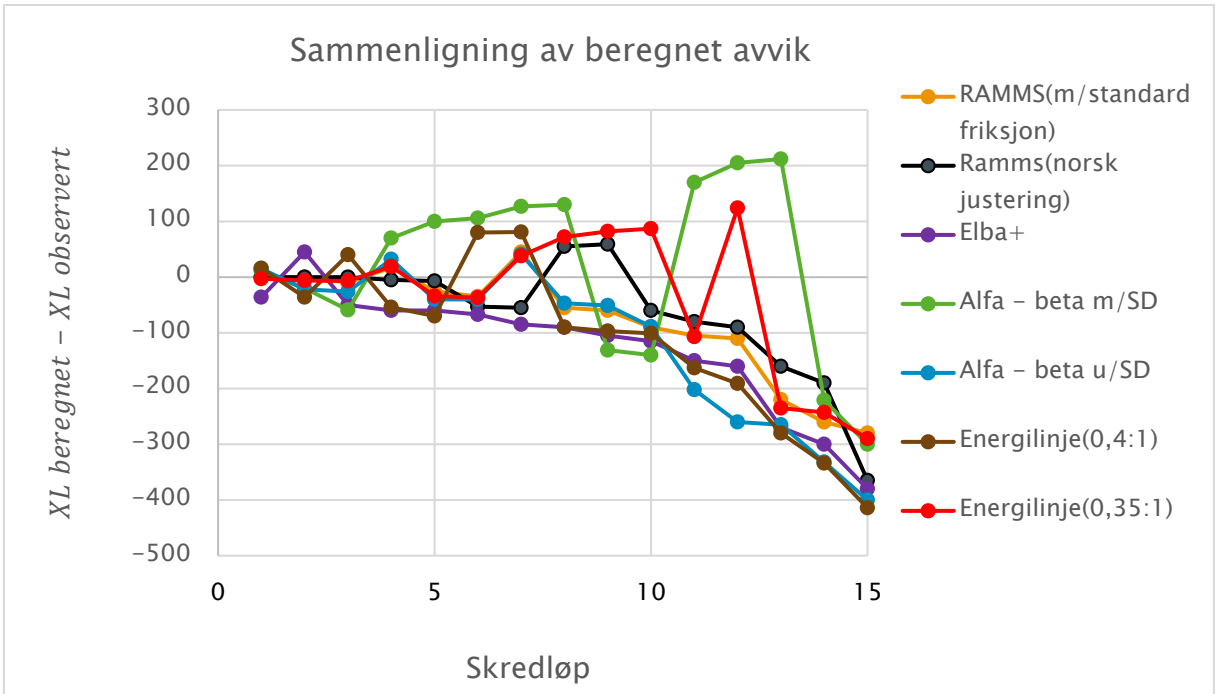
$\mathbf{R}_{RAMMS\ m/norsk\ justering}$ = **0,961**. $X_{L\ beregnet(gj.snitt)}$ - $X_{L\ observert(gj.snitt)}$ **- 63 meter**

Resultatene viser at beregnet utløp med justering av høydeintervall har noe større korrelasjon enn ved bruk av standardverdiene i RAMMS, og kommer derfor best ut av samtlige modeller i regresjonsanalysen. Dersom man nedjustere høydenivåene etter norsk skoggrense får man generelt et noe lengre utløp. Utløpene blir lengre i skredløp der skoggrense er lav. I skredløp med høy skoggrense har høydejusteringene minimal betydning for utløpsdistansen.

6.1.1 Vurdering av statistiske trender for avvik av utløpsdistanse

Grafene i figur 9 og verdiene for gjennomsnittlig avvik mellom beregnede og observerte utløp, viser at i 75% av skredløpene, beregner alle modellene systematisk for korte utløpsdistanser. Dette med unntaket av alfa – beta modellen m/SD der modellen har en tendens til å beregne for lang utløpsdistanse i en del av skredløpene. Det er stor variasjon hvor store avviket er mellom skredløpene. I tre av skredløpene beregner noen av modellene avvik på omtrent 400 meter, men de fleste avvikene ligger i intervallet 0-200 meter. Energilinje modellen (0,4:1), Elba+ og alfa – beta modellen u/SD beregner de korteste utløpdistansene, og står for noen av de største avvikene. Eksempelvis kommer energilinje modellen (0,4:1) ut med et avvik på ca. 400 meter for skredløp 15 – Heggtveitjuvet, mens de andre modellene har er avvik som ligger i intervallet 0 - 70 meter.

Resultatene i figur 9 og gjennomsnittlig avvik, viser at selv om to modeller får samme nøyaktighet i regresjonsanalysen, kan modellene komme ulikt ut ved å ha flest skredløp innenfor et akseptabelt avvik. Eksempel på dette er Elba+ og RAMMS som har lik korrelasjon, men der Elba+ konsekvent beregner noe kortere utløp enn RAMMS.



Figur 9. Grafisk fremstilling av beregnet avvik. Fremstillingen er ordnet slik at avvikene øker langs x – aksen.

I tillegg kan følgene resultater trekkes ut av figur 9:

- **RAMMS m/standard friksjon**: 9 av skredløpene har et avvik < 60 meter, 2 skredløp med avvik på 0 meter.
- **RAMMS m/norsk justering**: 10 av skredløpene har et avvik < 60 meter, 3 skredløp med et avvik på 0 meter.
- **Elba+**: 8 av skredløpene har et avvik < 90 meter, 0 skredløp med et avvik på 0 meter
- **Alfa – beta m/SD**: 4 av skredløp har et avvik < 70 meter, 0 skredløp med et avvik på 0 meter
- **Alfa – beta u/SD:** 9 av skredløp har et avvik < 60 meter, 0 skredløp med avvik på 0 meter.
- **Energilinje modellen (0,4:1)**: 8 av skredløp har et avvik < 90 meter, 0 skredløp med avvik på 0 meter
- **Energilinje modellen(0,35:1)**: 10 av skredløp har et avvik < 90 meter, 2 skredløp med avvik på 0 meter

Disse resultatene viser at RAMMS m/norsk justering, energilinje modellen(1:0,35), og alfa – beta u/SD kommer best ut ved å ha flest utløpsberegninger innenfor et avvik på 60 meter.

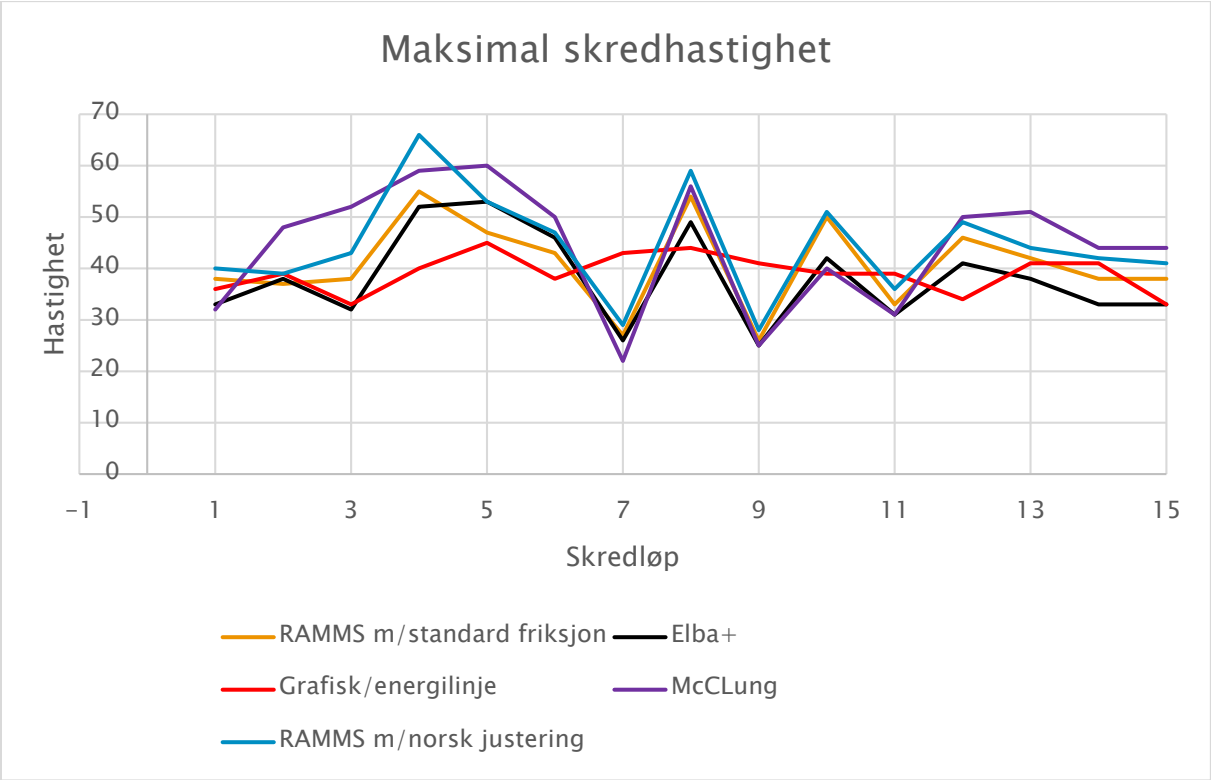
6.2 Maksimal hastighet og energitap(friksjon) i utløpsområdet

Tabell 5 viser maksimal hastighet til alle modellene med unntaket av alfa – beta modellen som ikke beregner skredhastighet. Videre angir tabellen beregnet energitap i utløpsområdet til RAMMS og Elba+.

Tabell 5. Maksimal skredhastighet og energitap(friksjon) i utløpsområdet.

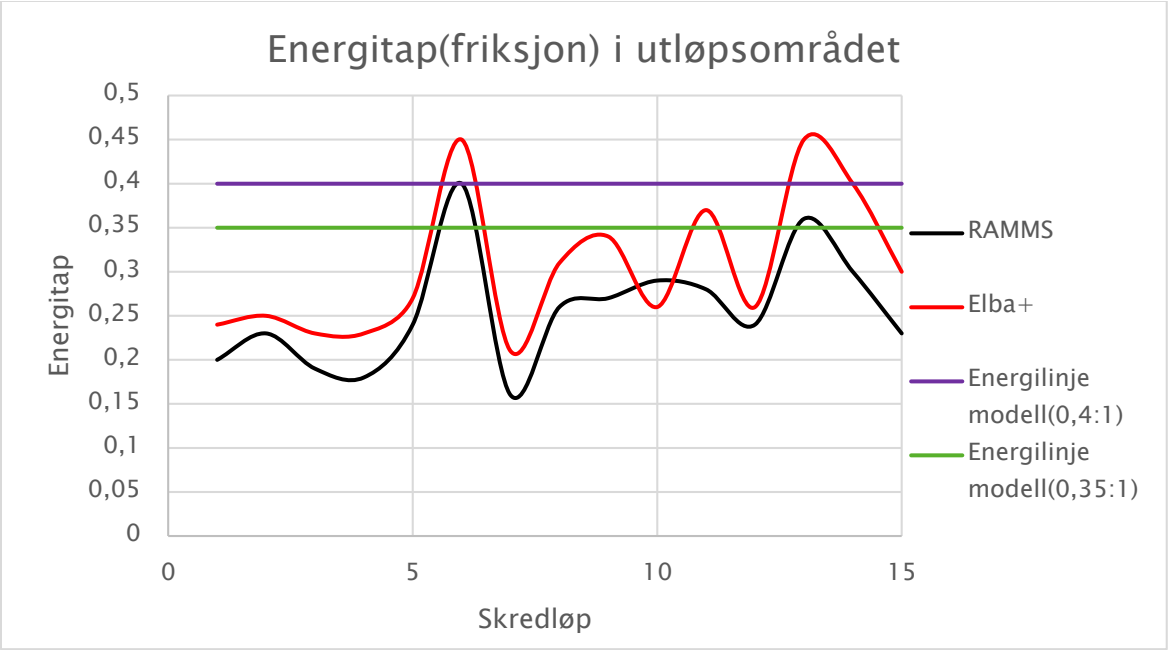
Skredløp	RAMMS (Standard parametere)	RAMMS (Norsk justering)	Elba+	Grafisk	Mclung	Energitap RAMMS	Energitap Elba+
Haukeli	38	40	33	36	32	0,20	0,24
Vindalsfonna	37	39	38	39	48	0,23	0,25
Nakkefonna	38	43	32	33	52	0,19	0,23
Tverrbotnfjellet	55	66	52	40	59	0,18	0,23
Joengfonna	47	53	53	45	60	0,24	0,27
Ryggfonn	43	47	46	38	50	0,40	0,45
Tyinstølen	27	29	26	43	22	0,16	0,21
Vassfonna	54	59	49	44	56	0,26	0,31
Hopseidet	26	28	25	41	25	0,27	0,34
Grøndalen	50	51	42	39	40	0,29	0,26
Sørdalen	33	36	31	39	31	0,28	0,37
Knutstugugrove	46	49	41	34	50	0,24	0,26
Kyrfonna	42	44	38	41	51	0,36	0,45
Sogndalsdalen	38	42	33	41	44	0,30	0,4
Heggtveitjuvet	38	41	33	33	44	0,23	0,3

Figur 10 viser en grafisk fremstilling av maksimal hastighet til alle modellene, og figur 11 viser beregnet energitap til RAMMS og Elba+. Grafene i disse figurene er generert fra Tabell 5.



Figur 10. Maksimal skredhastighet.

Resultatene i tabell 5 og figur 10 viser at RAMMS m/norsk justering beregner den høyeste maksimale hastigheten som er på ca. 65 m/s. Videre beregner McClung modellen den laveste hastigheten som er på like over 20 m/s. De fleste modellene beregner hastigheter som ligger i intervallet 30 – 60 m/s. RAMMS beregner generelt noe høyere hastigheter enn Elba+. Videre beregner RAMMS m/ norsk justering hastigheter på 3-5 m/s høyere enn med standard verdier. McClung modellen beregner overraskende like hastigheter og variasjon som de numeriske modellene. Energilinje modellen har mindre variasjon og beregner hastigheter i nærheten av 35 - 40 m/s for alle skredløpene. I skredløp med liten H, beregner energilinje modellen en god del høyere hastigheter enn de andre modellene.



Figur 11. Energitap(friksjon) i utløpsområdet, beregnet av RAMMS og Elba+.

Når det gjelder beregning av energitap viser resultatene i tabell 5 og figur 11 at Elba + har 7 skredløp som ligger i intervallet 0,3-0,4:1. RAMMS har kun 3 skredløp i det samme intervallet. Dette indikerer at Elba+ generelt beregner et høyere energitap i utløpsområdet enn RAMMS.

7 Oppsummering og diskusjon

Utløpsdistanse

Regresjonsanalysen viser at RAMMS og Elba+ med objektive input parametere, beregner ca. lik korrelasjon/nøyaktighet, der RAMMS m/norsk justering kommer best ut. Alfa-beta modellen m/SD og energilinje modellen(1:0,35) kommer best ut av de empiriske modellene, men med noe mindre nøyaktighet.

RAMMS m/norsk justering og energilinje modellen (0,35:1) kommer også best ut ved å ha flest skredløp, der beregnet utløp ikke avviker mer enn 60 – 90 meter fra observert utløp. I tillegg har disse modellene også flest skredløp, der beregnet og observert utløp er identisk. Dette er gode resultater og anses som tilfredsstillende i henhold til akseptable avvik. Elba+ og alfa – beta modellen m/SD har færrest avvik innenfor intervallet 50 – 100 meter. Dette viser at selv om to modeller har lik nøyaktighet i regresjonsanalysen er det ikke nødvendigvis at modellene har like mange skredløp innenfor et akseptabelt avvik.

Resultatene for beregnet utløpsdistanse, viser at de fleste modellene i 75 % av skredløpene, systematisk beregner for korte utløpdistanser med unntaket av alfa – beta modellen m/SD. Avviket varierer i stor grad fra skredløp til skredløp, der de største avvikene er på ca. 400 meter. De fleste modellene beregner avvik som ligger i intervallet 0 – 200 meter. Hovedårsakene til de største avvikene kan være følgende:

- Flere av de valgte skredløpene har terreng der det samles mye snø, noe som kan føre til at skredene vokser i størrelse nedover skredbanen på grunn av medrivning/erosjon.

Dette kan gi lange utløpsdistanser selv om løsneområdet har relativt beskjeden størrelse. Det ble ikke tatt hensyn til erosjon/medrivning for den numeriske simuleringen i denne analysen.

- Det er i noen av skredløpene knyttet usikkerheter til om ytterste registrerte grense av de faste massene til enkelte av de observerte skredene er helt riktige. Snøskyene i tørre skred går gjerne en del lenger enn de faste massene i skredet, noe som kan gi feil registering av utløpsdistanse.

- Det er knyttet usikkerhet til bredde av løsneområdet, spesielt i de skredløpene der man har størst avvik på beregnet og observert utløpsdistanse. Bredden på løsneflaket er den eneste parameteren for å bestemme totalt skredvolum, som må vurderes subjektiv etter fagpersonens eget skjønn. Feil vurdering av hvordan terrenget påvirker bruddforplantningen kan i noen tilfeller føre til at størrelsen på løsneområdet blir undervurdert.

- Vurdering av flaktykkelse er en faktor som også kan undervurdere skredvolumet. Selv om de objektive kriteriene som ble brukt i dette prosjektet ser ut til å fungere, vil det være tilfeller med spesielle forhold i snødekket som kan gi langt høyere bruddkanter enn det de objektive kriteriene beregner. Eksempel på dette er når skredene løsner langs spesielle svake lag helt nede ved bakken.

Disse nevnte usikkerhetene ovenfor medfører at valg av returperiode kan være undervurdert i noen av de valgte skredløpene. De største avvikene mellom beregnet og observert utløpsdistanse ødelegger en god del for regresjonsanalysen. Systematisk beregning av for noe korte utløpsdistanser i de numeriske modellene kan også indikere at friksjonsparameterne bør endres og kalibreres etter norske skred. Unøyaktig terrengmodell kan også være en potensiell feilkilde for dette avviket.

Alfa – beta modellen kommer generelt noe dårligere ut enn de numeriske modellene i denne analysen. Den topografiske modellen har til nå blitt sett på som den best egnete objektive modellen for beregning av utløpsdistanser for lange returperioder i Norge. Resultatene viser at de objektive kriteriene som ble brukt for bestemmelse av løsnevolum og friksjon i de numeriske modellene kan være fornuftige for norske skred med antatt returperiode på 100 – 300 år. Løsneområdet i de numeriske modellene ble ikke endret på etter utført simulering for å forbedre resultatene. Videre viser resultatene at alfa – beta modellen m/SD beregner ofte en god del for lange utløp i skredløp der de andre modellene har bedre nøyaktighet. De empiriske modellene står generelt for de største avvikene i denne analysen, mens de numeriske modellene generelt beregner mindre variasjoner.

Resultatene viser også at i skredløp med liten høydeforskjell (H) og i høyfjellsklima, beregner alfa - beta modellen kortest utløpsdistanse av samtlige modeller. De numeriske modellene kommer vesentlig bedre ut i disse skredløpene, spesielt RAMMS m/norsk justering av høydenivåene. Energilinje modellen (0,35:1) kommer også godt ut i disse skredløpene. Begge skredløpene som ble brukt i dette prosjektet har en jevn parabelformet kurvatur. I naturen vil en slik kurvatur gi bedre bevaring av den potensielle energien, der mindre andel av energien går over til varme. Det er også naturlig å anta at snøen kan være meget tørr i hele skredbanen i dette klimaområdet, noe som gir mindre friksjon i skredet. Disse faktorene kombinert sammen vil kunne gi meget lange utløp selv om den totale høydeforskjellen i skredløpet er liten og den maksimale skredhastigheten er lav. Det kan se ut som at denne effekten blir fanget best opp i RAMMS og energilinje modellen. I RAMMS blir blant annet friksjonsparameterne

automatisk satt lavere i høytliggende områder, noe som generelt vil gi lengre utløp i høyfjellsområder. På grunn av lite datagrunnlag fra slike områder, må man være forsiktig med å trekke bastante konklusjoner.

Elba+ beregner generelt noe kortere utløpsdistanser enn RAMMS, selv om modellen har ca. lik nøyaktighet i regresjonsanalysen. En årsak til dette avviket er sannsynligvis at modellene bruker ulike kriterier for bestemmelse av friksjonsforhold i nedre del av skredbanen.

RAMMS m/norsk justering kommer som nevnt best ut i regresjonsanalysen, og ved å ha flest skredløp innenfor et avvik på 60 meter. Nedjustering av høydenivåene gir generelt noe lengre utløpsdistanse og høyere maksimal skredhastighet, spesielt i skredløp der skoggrensen er lav. Dette betyr at justering av høydenivåene etter norsk skoggrense med intervaller på 500 m kan være fornuftig, men i noen tilfeller burde de kanskje ha vært nedjustert ytterligere, spesielt i skredløp som har høy skoggrense. En naturlig forklaring på dette er at også i mildere områder i Norge vil det i løpet av en lang returperiode oppstå forhold der snøen kan være meget tørr i hele skredbanen.

Resultatene for Hopseidet kan tyde på at energilinje modellen generelt sett beregner for lange utløp i korte skredbaner som har en brå vinkelendring i overgangen mellom skredløpet og utløpsområdet. I slike skredbaner vil gjerne 10^o og 20^o graders punktet ligger nærme hverandre et godt stykke ut i skredbanen. Videre ser det ut til at modellen beregner for korte og utløp i slake skredbaner der 10^o og 20^o punktet ligger langt fra hverandre. Heggtveitjuvet er et eksempel på en slik skredbane og her beregnet modellen(1:0,4) en utløpsdistanse på ca. 400 meter kortere enn observert. De numeriske modellene beregnet et avvik på 0-70 meter i dette skredløpet. Energilinje modellen ser derfor ut til å fungere best i skredbaner som har en jevn parabelformet kurvatur. Utløpsberegningene indikerer at bruk av energilinje modellen med en energilinje på 0,35:1, gir best resultat for returperioder på 100 -300 år.

Hastighet

Når det gjelder beregning av maksimal skredhastighet viser resultatene at ingen av modellene beregner høyere maksimal hastigheter enn det som er målt i virkeligheten. De fleste hastighetene ligger i intervallet 30 – 60 m/s, noe som er et godt samsvar med generelle målinger av skredhastigheter. Det er interessant å merke seg at den enkle empiriske modellen til McClung, som i teorien kun baserer seg på hastighetsuavhengig friksjon, gir minst like realistiske og varierende hastigheter som de kompliserte dynamiske modellene. Dette kan tyde på at den totale høydeforskjellen i skredbanen har stor betydning for maksimal skredhastighet. Resultatene viser også at denne modellen fungerer bra i norske skredløp. Energilinje modellen beregner forholdsvis lik hastighet i alle skredløpene selv om de topografiske forholdene i stor grad varierer. Dette kan tyde på at modellen er mindre fysisk riktig fordi den vil beregne for lave hastigheter i skredløp med store høydeforskjeller og for høye hastigheter i skredløp med lave høydeforskjeller. På en annen side kan høye hastigheter i skredløp med lave høydeforskjeller forsvarers med teorien om at et skred som består av tørr snø med små partikler mot bakken vil ha liten viskositeten. Dette kan gi forholdsvis store hastigheter til tørre snøskred, selv i skredbaner med lav høydeforskjell. Målinger av virkelige skred viser at hastighetene fort kan komme opp i 40 m/s, også i mindre skredbaner. Både klimatiske og topografiske forskjeller vil påvirke maksimal hastighet fra et skredområde til et annet. Derfor skal man være forsiktig med å trekke for raske konklusjoner om hvilken modell som er mest fysisk riktig med tanke på maksimal hastighet.

Energitap i utløpsområdet

Beregning av energitap for de 200 nederste meterne i utløpsområdet viser at Elba+ har 7 skredløp, der energilinjen har en helning på 0,3-0,4:1, mens RAMMS kun har tre skredløp i dette intervallet. Disse resultatene kan indikere at Elba+ beregner en mer realistisk oppbremsing i utløpsområdet enn RAMMS. Samtidig viser resultatene at Elba+ også beregner lavere helninger enn akseptabelt intervall i omtrent halvparten av skredløpene. Hvordan de numeriske modellene simulerer oppbremsingen i utløpsområdet er viktig med tanke på å bruke riktig dimensjonerende hastighet der et sikringstiltak skal plasseres. Dersom en modell beregner energilinjer med slak helning i utløpsområdet kan dette gi for lave hastigheter og dermed underdimensjonering i øvre del av utløpsområdet. En bratt energilinje vil gi høyere hastigheter lenger ut i utløpsområdet, men en raskere oppbremsing. I følge observasjoner av skred i naturen ser det ut som at skredene kan ha forholdsvis stor hastighet et stykke ut i utløpsområdet før oppbremsingen skjer relativt raskt på grunn av blant annet sintring. Disse observasjonene samsvarer best med bratte energilinjer. Det er viktig å nevne at det hefter usikkerhet av tilbakeregningene som er gjort for å beregne helning på energilinjen. Dette fordi hastighetsdataene kun er hentet fra noen få skredløp og vil derfor ikke representere alle klimatiske og topografiske forskjeller i hele landet. Likevel indikerer resultatene at man skal være forsiktig med å bruke hastigheter fra de numeriske modellene for å vurdere dimensjonerende hastighet, spesielt i øvre del av utløpsområdet.

Når dimensjonerende hastighet skal bestemmes i forbindelse med planlegging av sikringstiltak kan en løsning være å trekke en energilinje med helning på 0,4 – 0,35:1 (avhengig av returperiode) fra beregnet utløp med RAMMS, eller fra et kjent utløp. Elba+ kan også benyttes til dette formålet, men det vil være viktig at beregnet utløp er langt nok. SLF har oppgradert skredmodulen i RAMMS der blant annet Voellmy – reologien tar hensyn til kohesjon i skredmassene. Dette vil påvirke hvordan modellen beregner oppbremsingen i utløpsområdet. Ved å angi en høy kohesjon, vil modellen kunne beregne en raskere oppbremsing. På grunn av lite erfaringer for gode objektive verdier for tørre skredmasser, ble kohesjonen sett bort fra i denne analysen. Kohesjonen vil uansett ha størst betydning for fuktige skredmasser, der snøkrystallene i større grad er i kontakt med hverandre.

Oppsummering

Dynamikken i snøskred er komplisert og ennå ikke fullt ut forstått. De matematiske ligningene som benyttes i RAMMS og Elba+ for å beskrive skredbevegelsen inneholder flere ukjente ledd. Modellene har til nå kun tatt hensyn til de faste massene i tørre snøskred og i liten grad tatt hensyn til at snøens fysiske egenskaper endres underveis i skredløpet. De numeriske modellene får likevel noe bedre resultater for beregning av utløpsdistanse enn de empiriske modellene. I 2/3 av skredløpene beregner RAMMS m/norsk justering et avvik under 60 meter i forhold til observert utløp. Disse resultatene betyr at anvendelse av hydrauliske lover ved bruk Vollemy – reologien kanskje er den beste tilnærmingen vi har i dag for å beskrive snøskred i bevegelse.

Det forskes stadig på hvordan de dynamiske modellene skal ta bedre hensyn til erosjon/medrivning og regulering av masser under skredbevegelsen. Dette er allerede i ferd med å bli implementert i enkelte modeller. I tillegg er det også i ferd med å bli utviklet moduler som tar hensyn til at temperaturforholdene har innflytelse på granulære egenskaper til skredet. Dette gjør det mulig å simulere forskjeller i tetthet mellom de faste skredmassene og snøskyen. Ved å angi temperaturen i snøen langs skredbanen vil det også være mulig å

simulere våte snøskred. Tiden vil vise om man får enda bedre resultater med de dynamiske modellene dersom disse faktorene tas hensyn til.

En av de største utfordringene med å bruke numeriske modeller er at ved å endre på input parametere kan man få skredene til å stoppe der en vil. Når man skal bestemme skredgrenser i et området der man ikke har kjennskap til historiske skred, kan feil input i modellene få store konsekvenser for risikovurderingen av infrastruktur. Det er derfor viktig at det utarbeides en metodikk der input parameterne mest mulig baserer seg på objektive kriterier. Det er også viktig at modellering med både numeriske og empiriske modeller, blir utført av fagpersoner med erfaring og forståelse av hvordan modellene fungerer.

Brukervennlighet og kostander påvirker også den totale kvalitetsvurderingen til en modell. Alle modellene som ble brukt i dette prosjektet har relativt god brukervennlighet, men det kreves kunnskaper for bruk av Novapoint og ArcGIS for å kunne få nøyaktige resultater med de empiriske modellene. Når det gjelder kostander er de empiriske modellene gratis å anskaffe, sammenlignet med de kommersielle numeriske modellene der lisenser må kjøpes.

Bruk av både numeriske og empiriske modeller vil aldri kunne simulere virkeligheten, men vil være gode hjelpemiddel for å vurdere skredgrenser i arealplanlegging. De numeriske modellene vil kunne simulere hvordan skredene brer seg til sidene i utløpsområdet, noe som de empiriske modellene ikke hensyn til. En modell som beregner skredutbredelse over et 3-dimensjonalt terreng kan være et godt hjelpemiddel for å vurdere hvor stor bredde som må sikres.

Når det utføres ulike modelleringsoppdrag viser resultatene at det kan være en fordel å benytte kommersielle numeriske modeller sammen med empiriske modeller for å få et bedre støttegrunnlag. Dette er spesielt viktig for vurderingen av dimensjonerende skredhastighet.

8 Konklusjon

Resultatene viser at det er både styrker/svakheter med hver modell alt etter hvilket formål modellene skal brukes til. Det er derfor utfordrende å konkludere med hvilke(n) modell(er) som er best egnet for norske skred basert på fysisk riktighet, brukervennlighet og kostnader. I dette prosjektet har vurderingen av fysisk riktighet vært basert på beregnet utløpsdistanse, maksimal hastighet, og energitap i utløpsområdet. De observerte/målte verdiene av disse faktorene til observerte skred er ikke 100 % sikre og vil i tillegg endre seg fra skredbane til skredbane. Konklusjonene i dette prosjektet må derfor anvendes med forsiktighet.

Punktene under oppsummerer de viktigste konklusjonene ut fra problemstillingene som ble satt for dette prosjektet:

- Resultatene for beregnet utløpsdistanse viser at de fleste modellene systematisk beregner for kort utløpdistanser med unntaket av alfa – beta modellen m/SD. De numeriske modellene med objektive input parametere, beregner utløpsdistanser mest nøyaktig i norske skredbaner for antatte returperiode på 100 – 300 år. RAMMS m/norsk justering etter skoggrensen, kommer best ut av samtlige modeller. Energilinje modellen med en energilinje på 0,35:1, kommer best ut av de empiriske modellene. RAMMS m/norsk justering og energilinje modellen (0,35:1) kommer også best ut ved å ha flest skredløp innenfor et akseptabelt avvik mellom beregnet og observert utløp.

- Nedjustering av høydenivåene i RAMMS etter skoggrense kan være en fornuftig vurdering for norske skredløp, men for lengre returperioder bør de nedjusteres ytterligere, spesielt i skredløp med høy skoggrense.

- Det anbefales å bruke objektive kriteriene for bestemmelse av løsnevolum og friksjon i de numeriske modellene. Metodikk som ble brukt i denne analysen kan være et fornuftige utgangspunkt for norske skred med antatt returperiode på 100 – 300 år.

- Alfa - beta modellen beregner kortest utløpsdistanse av samtlige modeller i skredløp med liten total høydeforskjell (h_L) som ligger i høyfjellsklima. De numeriske modellene og energilinje modellen kommer vesentlig bedre ut i disse skredløpene.

- Energilinje modellen beregner generelt for lange utløp i korte skredbaner som har en brå vinkelendring i overgangen mellom skredløp og utløpsområdet. I slike skredbaner vil gjerne 10^o og 20^o punktet ligger nærme hverandre et godt stykke ut i skredbanen. Videre ser det ut til at modellen beregner for korte og utløp i slake skredbaner der 10^o og 20^o punktet ligger langt fra hverandre. Utløpsberegningene viser at bruk av energilinje modellen med en helning på 0,35:1, sannsynligvis fungerer best for store, sjeldne skred med returperiode på 100-300.

- De fleste modellene ser tilsynelatende ut til å beregne realistiske maksimale skredhastigheter. Det er ikke mulig å konkludere noe om fysisk riktighet i forhold til vurdering av maksimal skredhastighet. McClung modellen som er en meget enkel modell, gir minst like realistiske og varierende hastigheter sammenlignet med de kompliserte dynamiske modellene.

- De numeriske modellene beregner generelt et for lite energitap i utløpsområdet sammenlignet med målte skred. RAMMS beregner minst energitap dersom man ikke

tar hensyn til kohesjonen. Dersom kohesjon ikke blir angitt, bør man være forsiktighet med å bruke RAMMS for å vurdere dimensjonerende hastighet, spesielt i øvre del av utløpsområdet. Når dimensjonerende hastighet skal bestemmes i forbindelse med planlegging av sikringstiltak kan en løsning være å trekke en energilinje med helning på 0,4 – 0,35: 1(avhengig av returperiode) fra beregnet utløp med RAMMS, eller fra et kjent utløp.

- Alle modellene som ble brukt i prosjektet har relativt god brukervennlighet, men det kreves kunnskaper for bruk av Novapoint og ArcGIS for å kunne få nøyaktige resultater med de empiriske modellene.

Når det utføres ulike modelleringsoppdrag for kartlegging og dimensjonering av sikringstiltak, anbefales det at både kommersielle numeriske modeller og empiriske modeller, benyttes sammen for å få bedre støttegrunnlag. Dette er spesielt viktig for vurderingen av dimensjonerende skredhastighet. Modelleringen bør blir utført av fagpersoner med kunnskap om snøskreddynamikk og forståelse av hvordan modellene fungerer.

Referanser

Bakkehøi, S., Norem, H. (1994). Sammenlikning av metoder for beregning av maksimal utløpsdistanse for snøskred. Rapportnr 581200-30. Norges Geologiske Institutt, Oslo, Norge.

Bartelt, P., Buehler, Y., Christen, M., Deubelbeiss, Y., Salz, M., Schneider, M., & Schumacher, L. (2013). RAMMS: Rapid Mass Movement Simulation: A numerical model for snow avalanches in research and practice. *User Manual v1*.

Bühler, Y., Christen, M., Dreier, L., Feistl, T., & Bartelt, P. (2014). Merging of recent developments in avalanche simulation technology into practice. International Snow Science Workshop ISSW, Banff, BC, Canada.

Fitzharris, B. B. (1981). Frequency and climatology of major avalanches at Rogers Pass, 1909 to 1977. *Paper, Division of Building Research, National Research Council Canada*, (956), 99

Krangnes, L. (2015). Oppsummering etter skred 12. og 13. januar ved Knutstugugrove, Lom. Cautus Geo, Norge.

Körner, H. J. (1980). The energy-line method in the mechanics of avalanches. *Journal of Glaciology*, *26*, 501-505.

Lied, K., Kristensen, K. (2003). Håndbok om snøskred. Norges Geologiske Institutt, Oslo, Norge.

McClung, D.M. (1990). A modell for scaling avalanche speeds. Journal of Glaciology 36(123): side 188-198.

Norem, H. (1995). The Ryggfonn project: summary report 1981–1995. Techreport A952-1, Dr. ing. Harald Norem A/S Consultant in Snow Engineering, Molde, Norway.

Norem, H. (2014). Veger og snøskred. Håndbok V138. Vegdirektoratet, Trondheim, Norge.

Norem, H., Irgens, F., & Schieldrop, B. (1986, September). A continuum model for calculating snow avalanche velocities. In Proceedings of the Symposium on Avalanche Formation, Movement and Effects, Davos, Switzerland (pp. 14-19).

Norem, H., Irgens, F., & Schieldrop, B. (1989). Simulation of snow-avalanche flow in run-out zones. Ann. Glaciol, 13, 218-225.

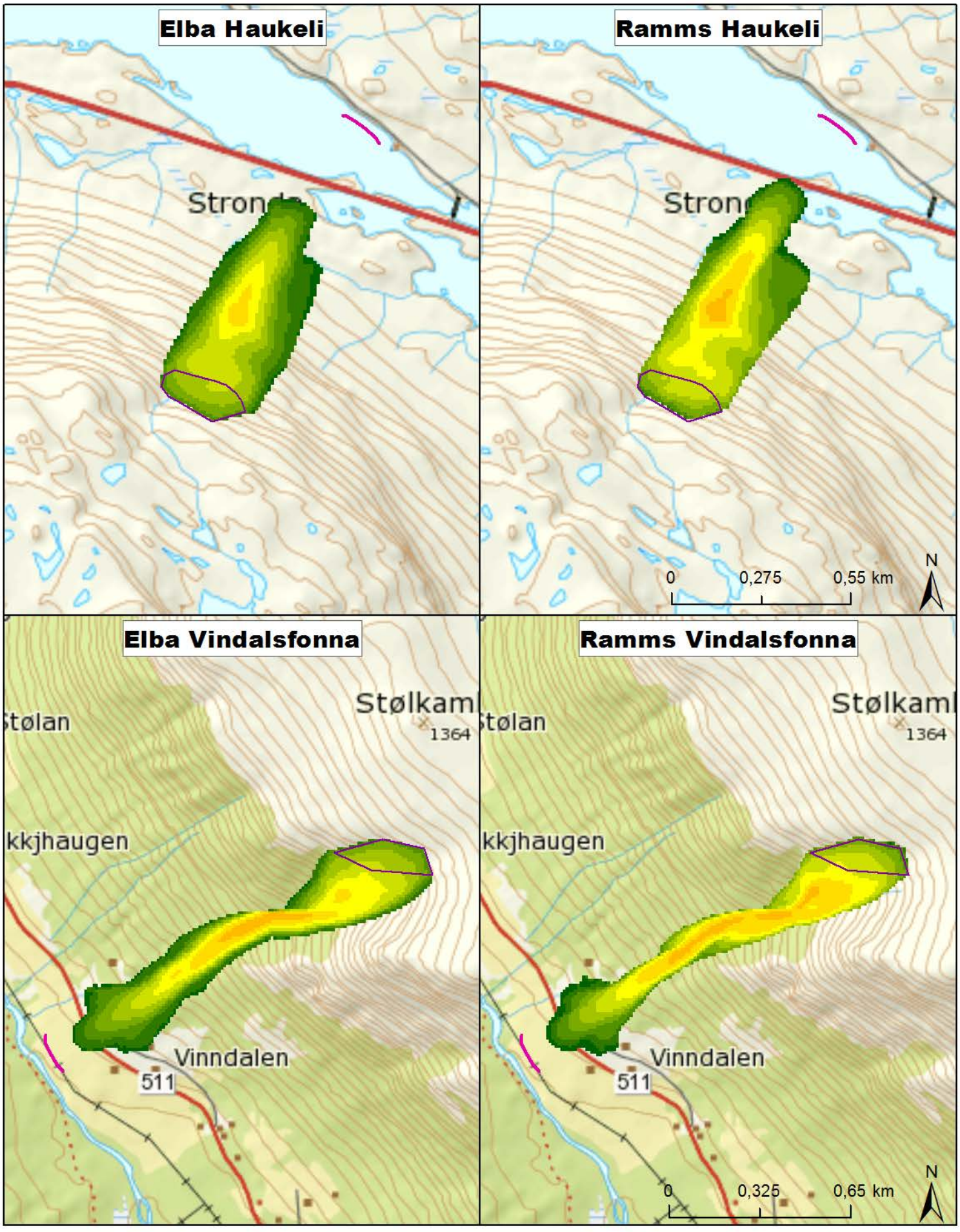
Perla, R., Cheng, T. T., & McClung, D. M. (1980). A two-parameter model of snow-avalanche motion. Journal of Glaciology, 26, 197-207.

Salm, B., Gubler, H. U., & Burkard, A. (1990). Berechnung von Fliesslawinen: eine Anleitung für Praktiker mit Beispielen. Eidgenössisches Institut für Schnee-und Lawinenforschung, Weissfluhjoch/Davos.

SLF. (2012). RAMMS user workshop, September 3rd – 7th. Davos, Switzerland.

Voellmy (1955). Uber die Zerstorungskraft von Lawinen Scweiz. Bauzeitung. 73(12) 159-162; (15) 212-217; (19) 280-285

Volk, G., Kleemayr, K. (2000). 2-Dimmensional Avalanch Modelling, Applying Variable Parameter Voellmy-type Avalanche Model. Østerrike.



Tegnforklaring

Løsneområde

Utløpsdistanse

Hastighet m/s

0 - 1

1- 5

5 - 10

10 - 15

15 - 20

20 - 25

25 - 30

30 - 35

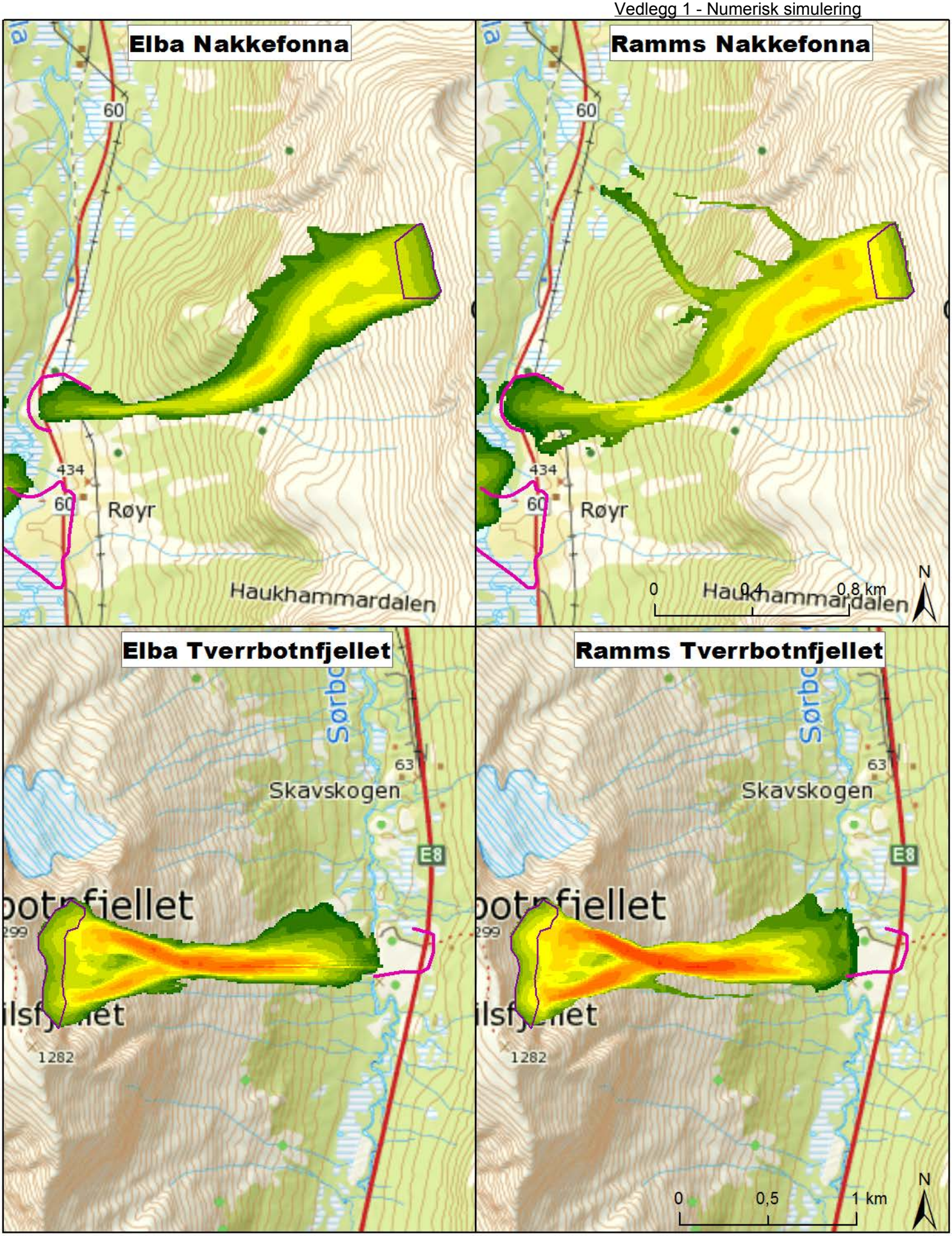
35 - 40

40 - 45

45 - 50

50 - 55

55 - 60



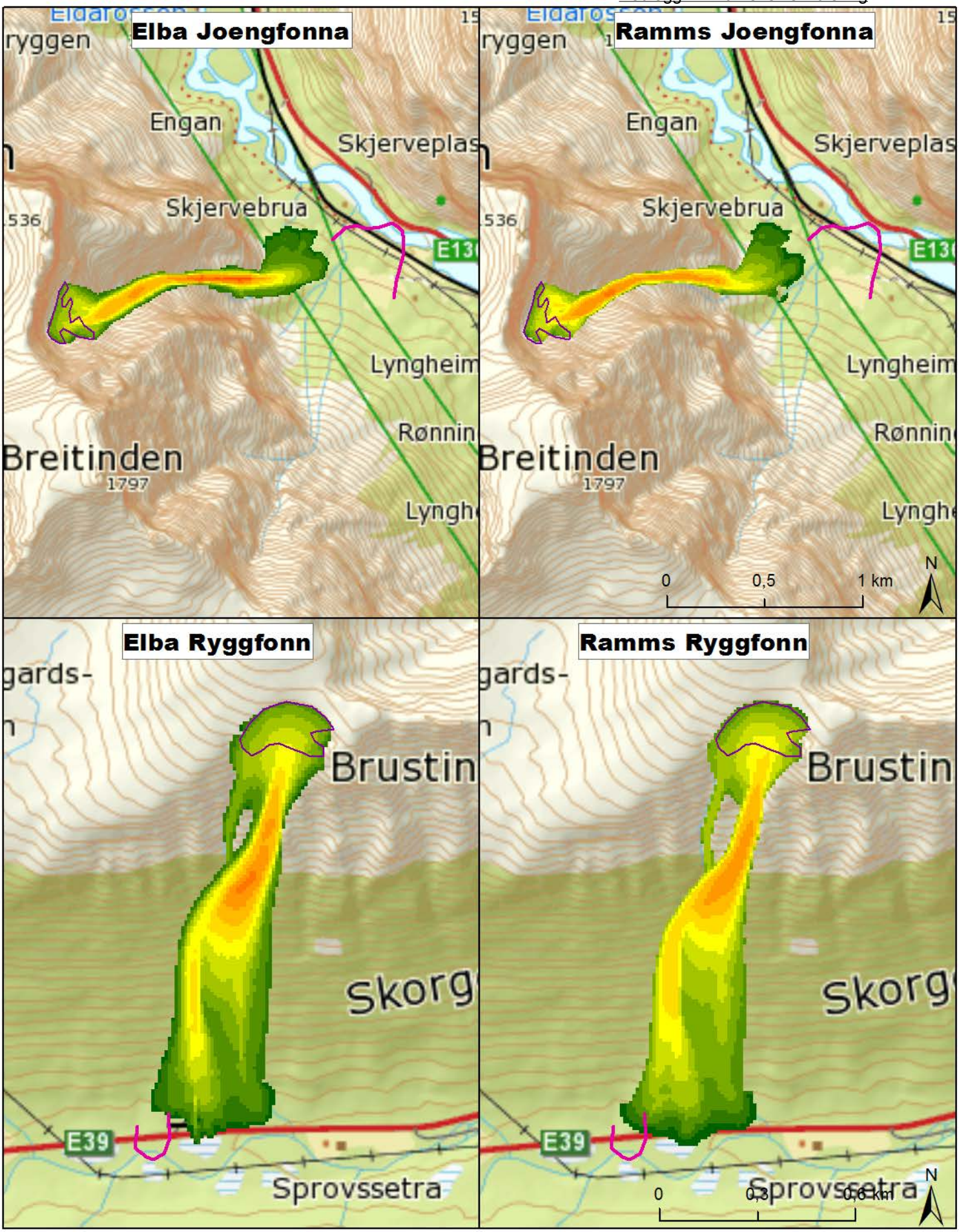
Tegnforklaring

Løsneområde

Utløpsdistanse

Hastighet m/s

0 - 1	5 - 10	20 - 25	35 - 40	50 - 55
1- 5	10 - 15	25 - 30	40 - 45	55 - 60
	15 - 20	30 - 35	45 - 50	



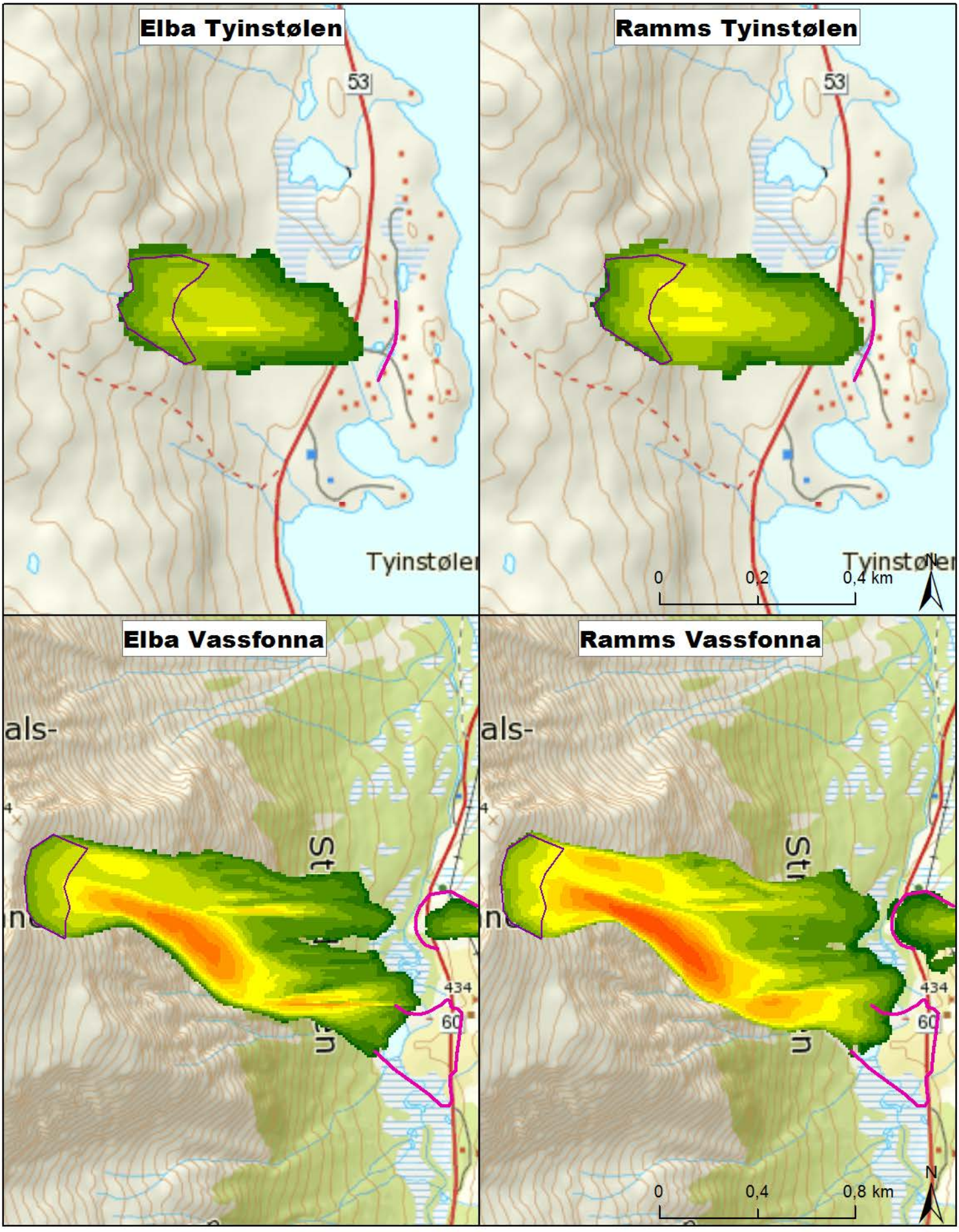
Tegnforklaring

Løsneområde

Utløpsdistanse

Hastighet m/s

0 - 1	5 - 10	20 - 25	35 - 40	50 - 55
1- 5	10 - 15	25 - 30	40 - 45	55 - 60
	15 - 20	30 - 35	45 - 50	



Tegnforklaring

Løsneområde

Utløpsdistanse

Hastighet m/s

0 - 1

1- 5

5 - 10

10 - 15

15 - 20

20 - 25

25 - 30

30 - 35

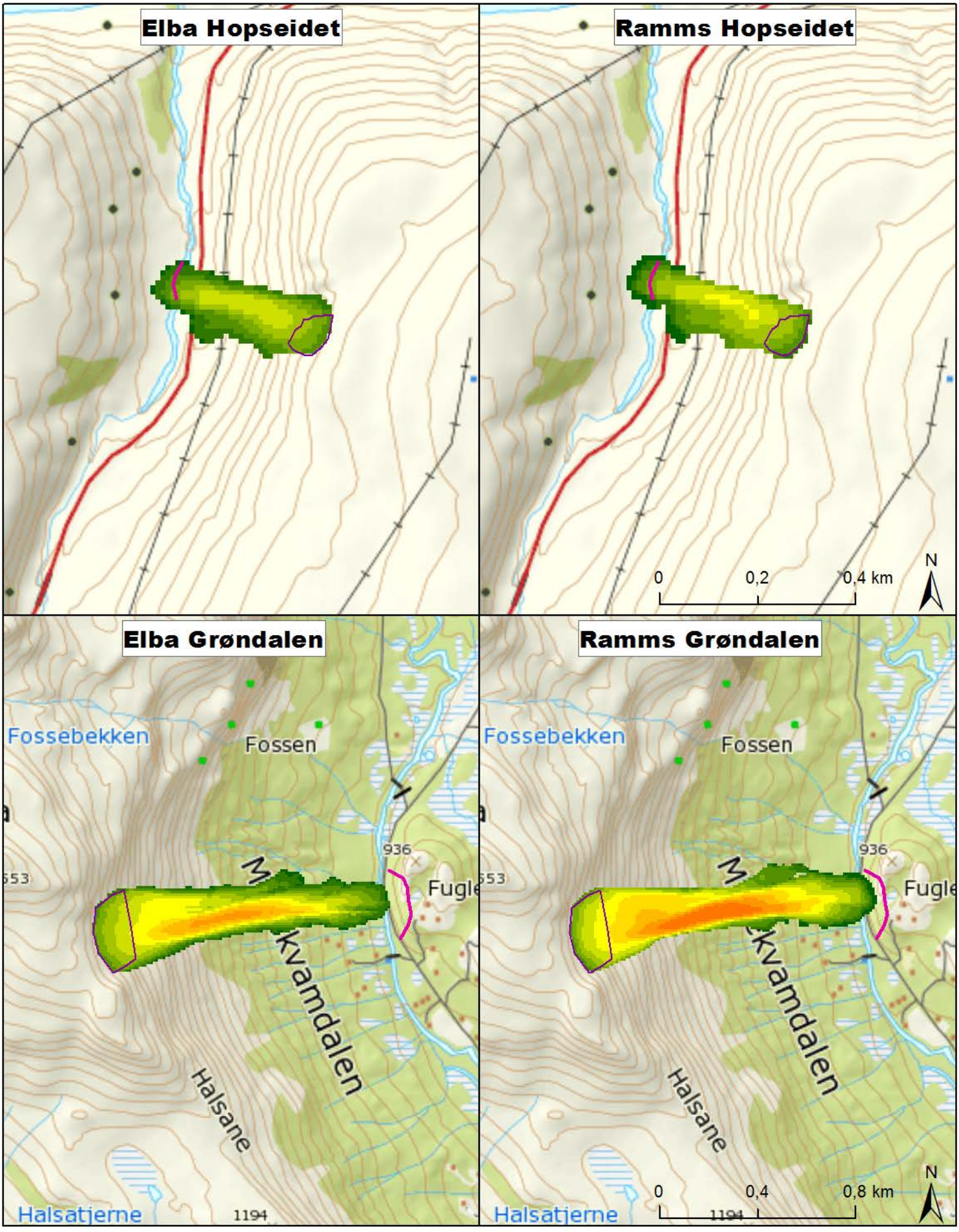
35 - 40

40 - 45

45 - 50

50 - 55

55 - 60



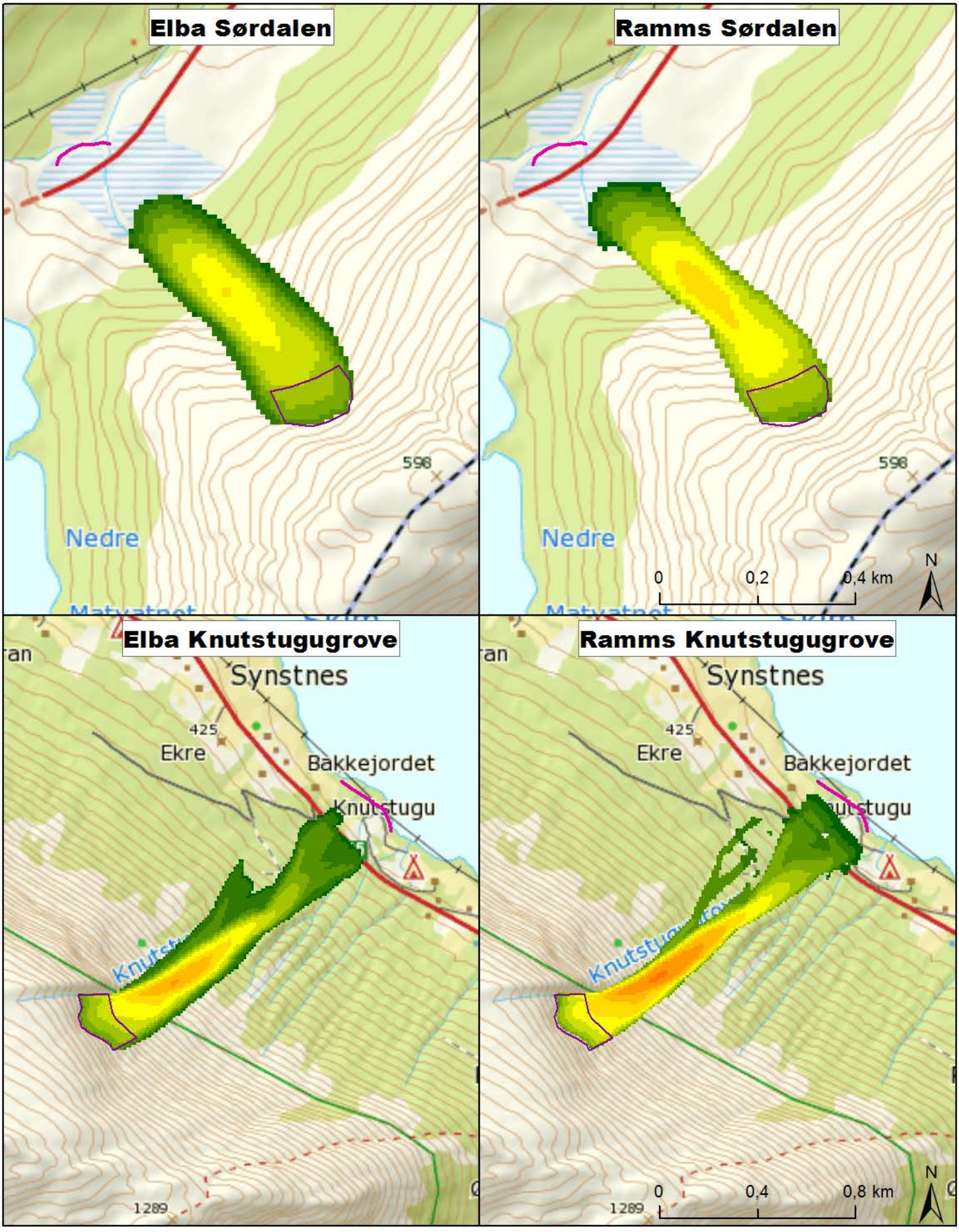
Tegnforklaring

Løsneområde

Utløpsdistanse

Hastighet m/s

0 - 1	5 - 10	20 - 25	35 - 40	50 - 55
1- 5	10 - 15	25 - 30	40 - 45	55 - 60
	15 - 20	30 - 35	45 - 50	



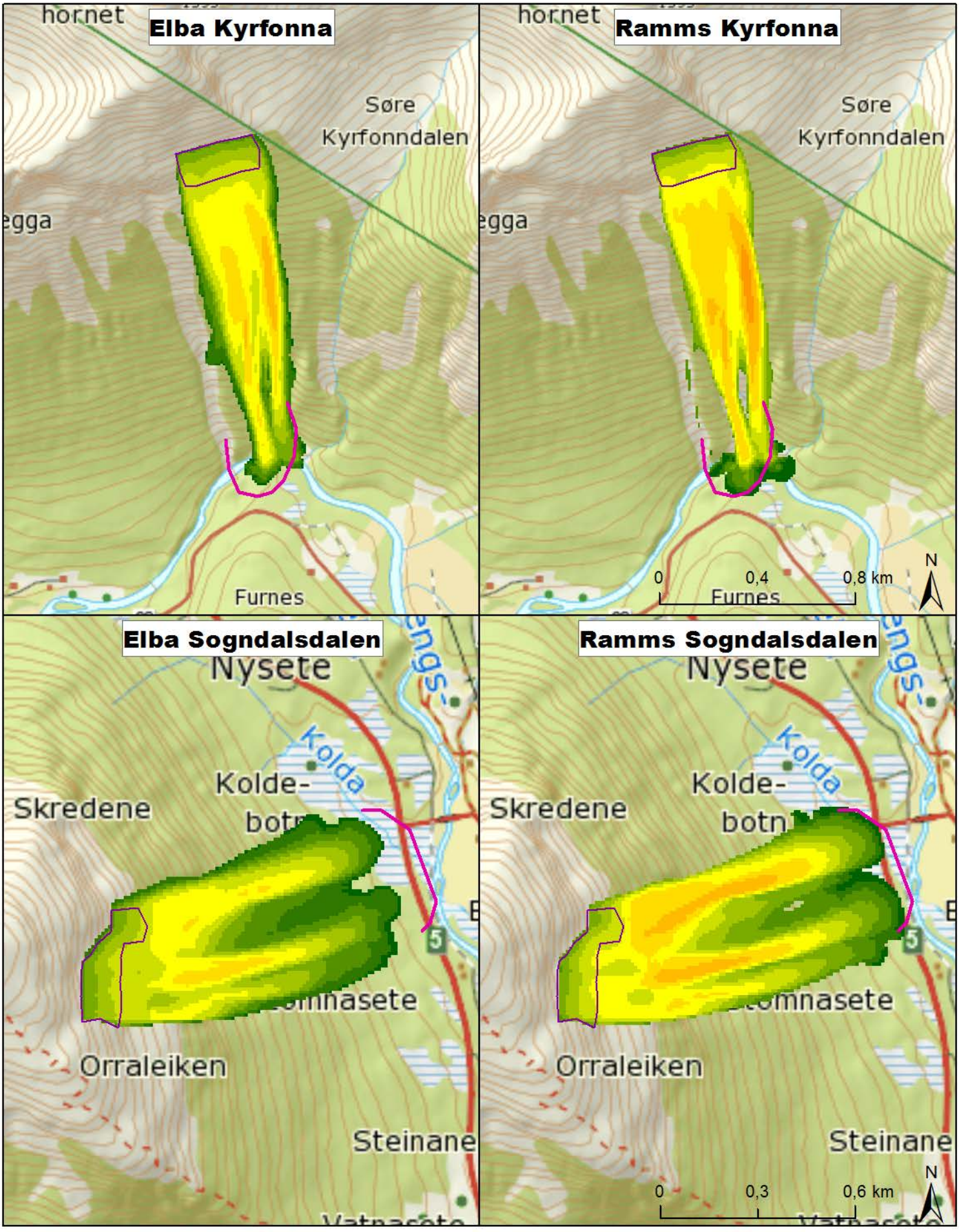
Tegnforklaring

Løsneområde

Utløpsdistanse

Hastighet m/s

0 - 1	5 - 10	20 - 25	35 - 40	50 - 55
1- 5	10 - 15	25 - 30	40 - 45	55 - 60
	15 - 20	30 - 35	45 - 50	



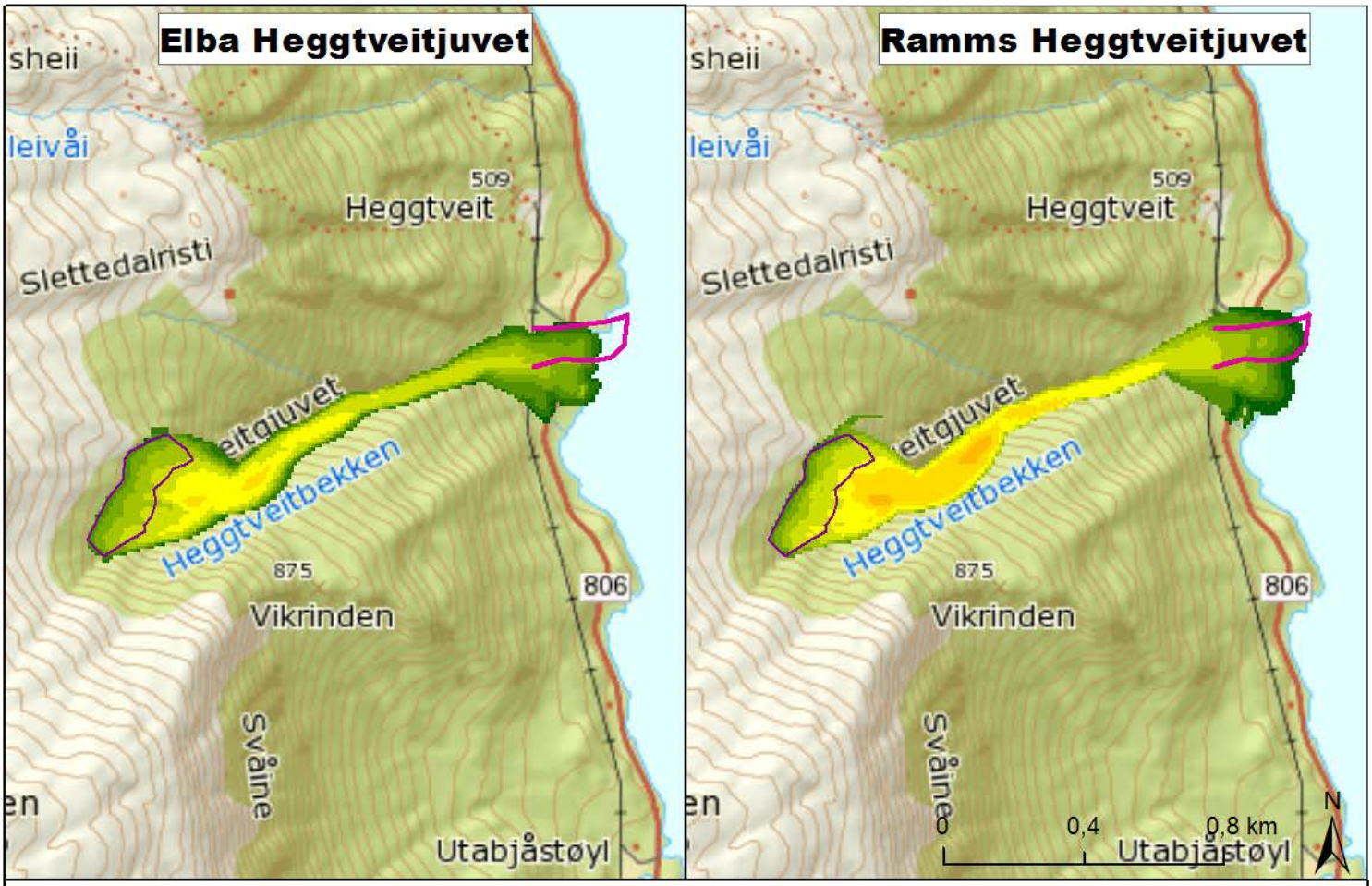
Tegnforklaring

Løsneområde

Utløpsdistanse

Hastighet m/s

0 - 1
1- 5
5 - 10
10 - 15
15 - 20
20 - 25
25 - 30
30 - 35
35 - 40
40 - 45
45 - 50
50 - 55
55 - 60



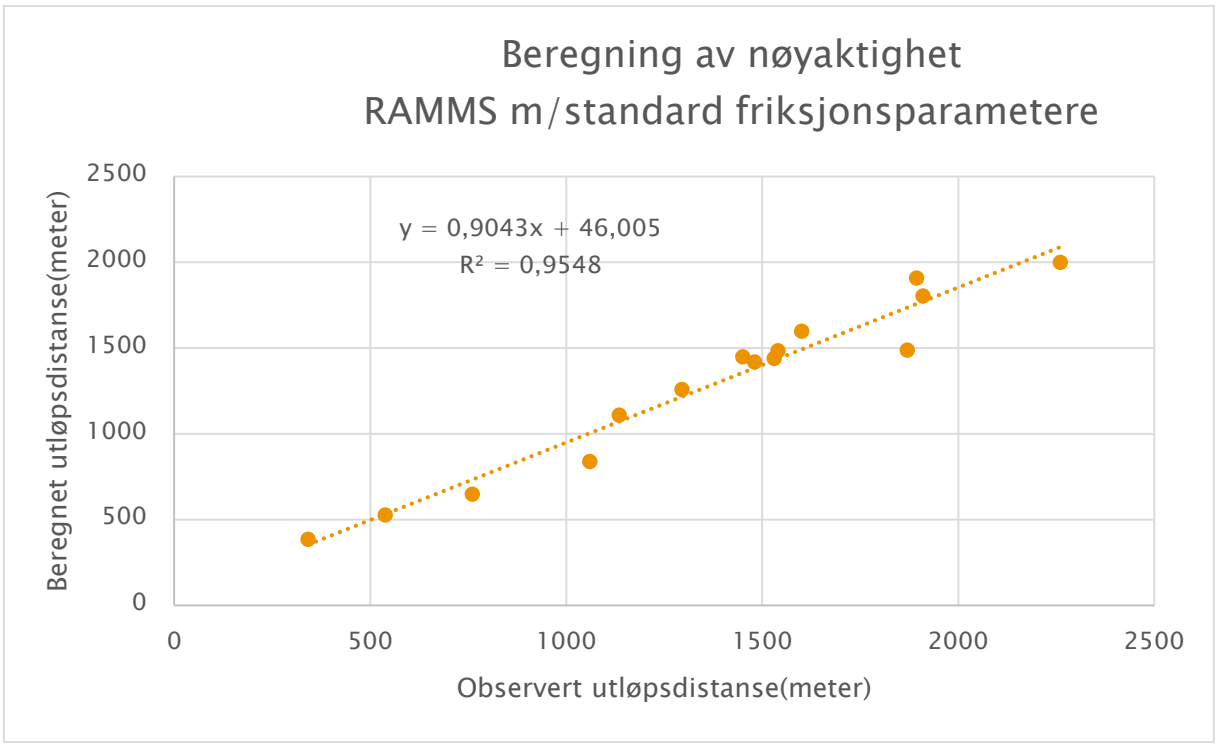
Tegnforklaring

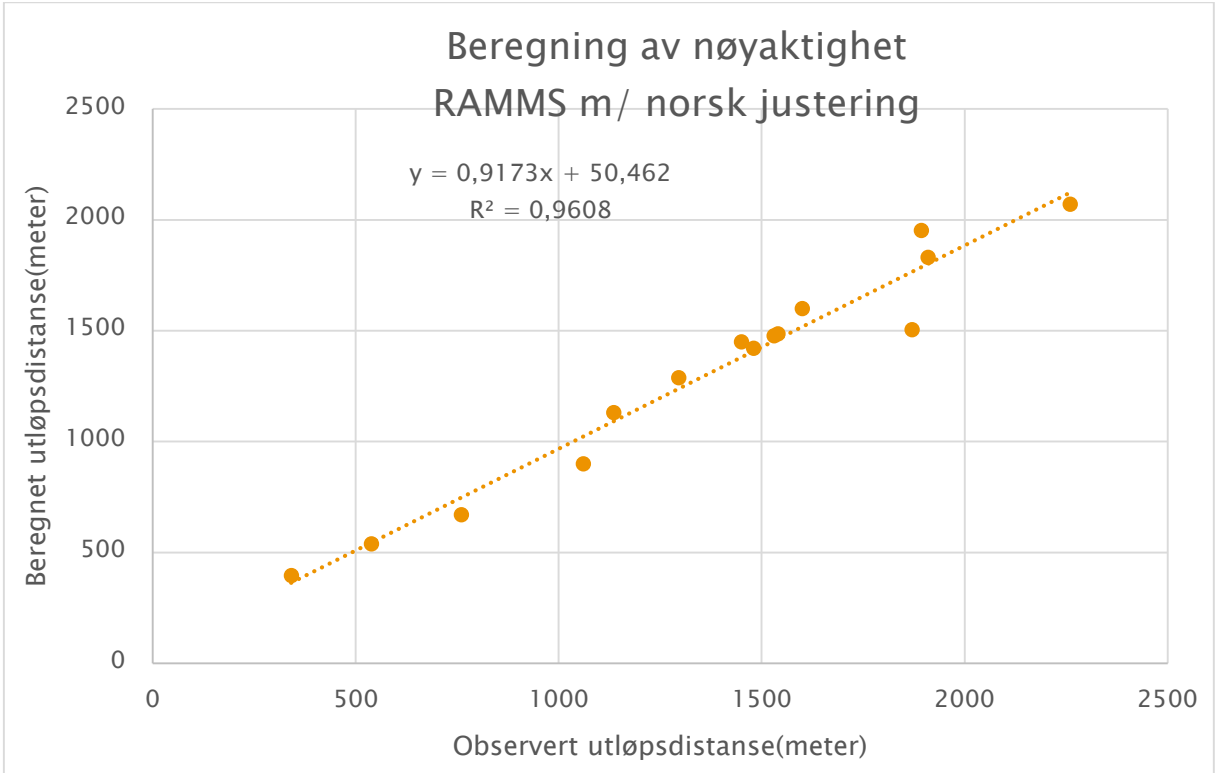
Løsneområde

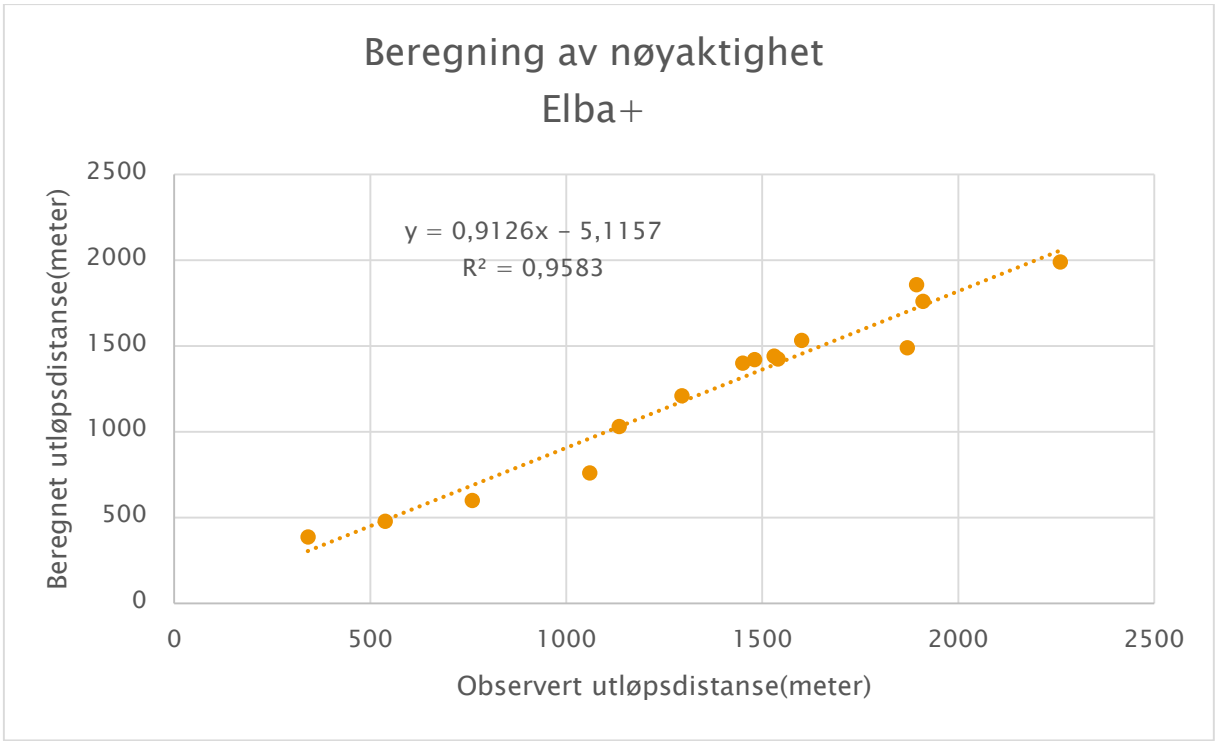
Utløpsdistanse

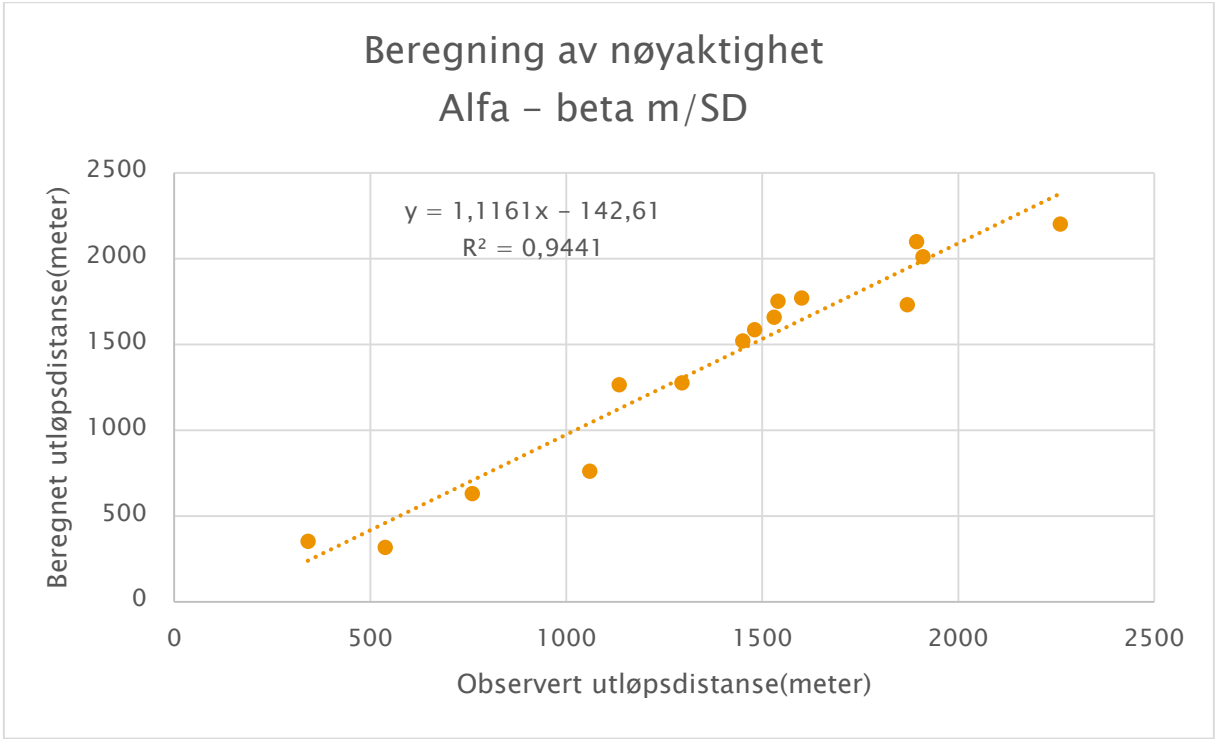
Hastighet m/s

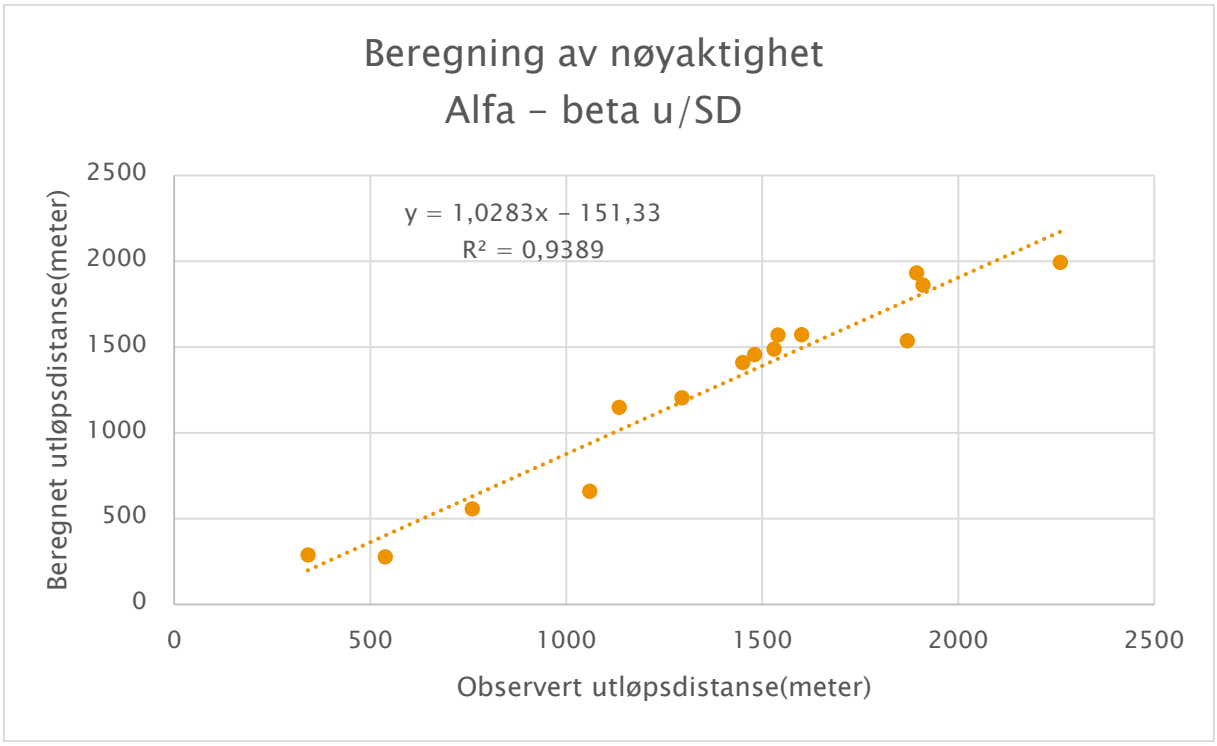
0 - 1
1- 5
5 - 10
10 - 15
15 - 20
20 - 25
25 - 30
30 - 35
35 - 40
40 - 45
45 - 50
50 - 55
55 - 60

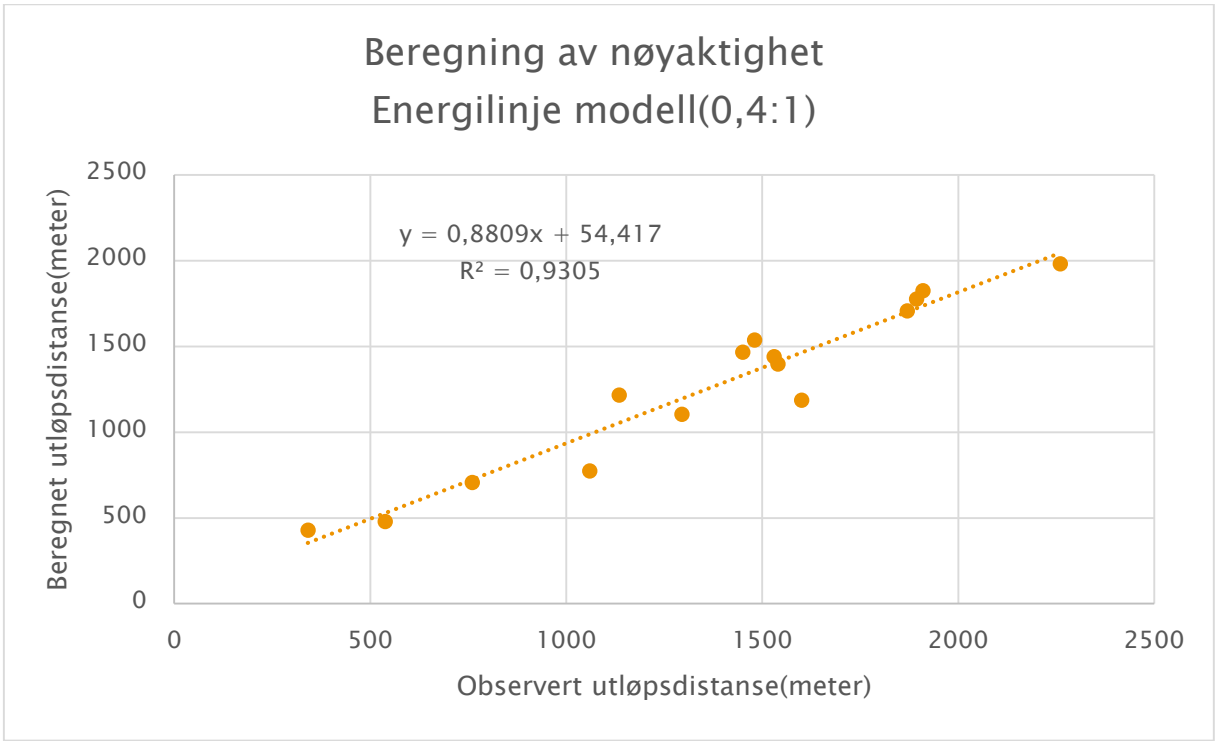

Beregning av nøyaktighet
RAMMS m/standard friksjonsparametere
y = 0,9043x + 46,005
R² = 0,9548
Beregnet utløpsdistanse(meter)
Observert utløpsdistanse(meter)
0
500
1000
1500
2000
2500

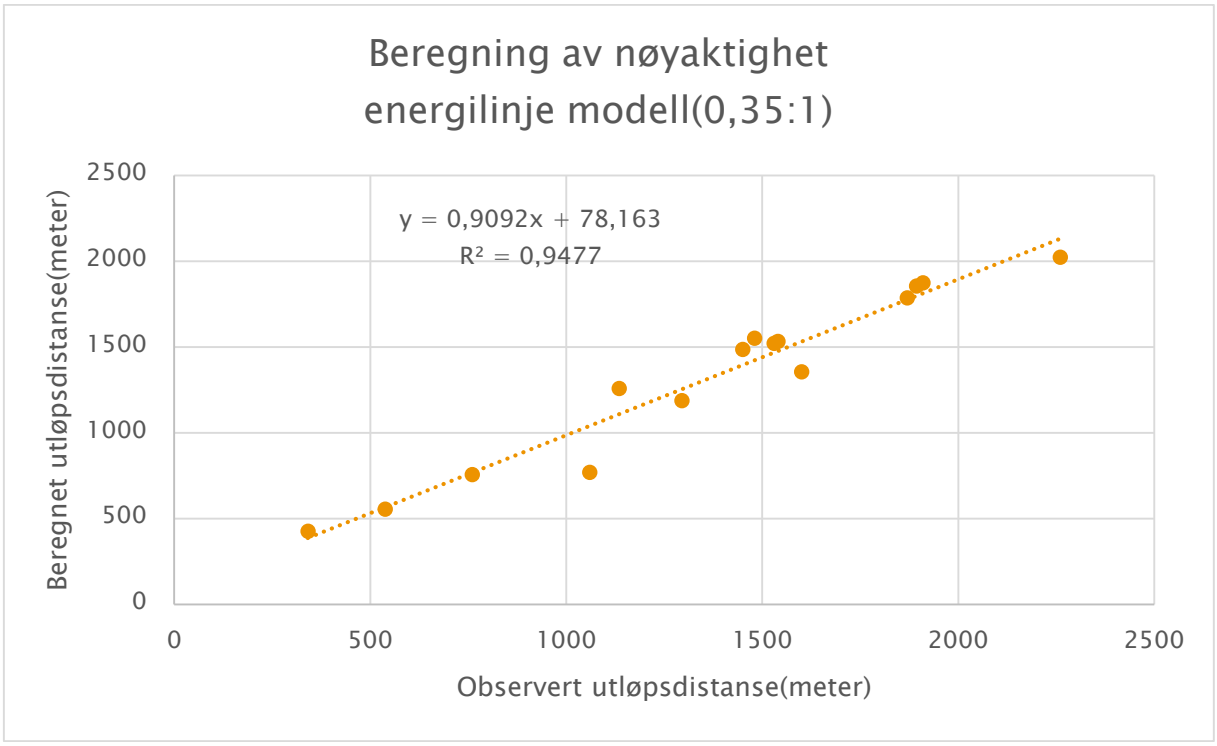

Beregning av nøyaktighet
RAMMS m/ norsk justering
y = 0,9173x + 50,462
R² = 0,9608
Beregnet utløpsdistanse(meter)
Observert utløpsdistanse(meter)
0
500
1000
1500
2000
2500


Beregning av nøyaktighet
Elba+
y = 0,9126x - 5,1157
R² = 0,9583
Beregnet utløpsdistanse(meter)
Observert utløpsdistanse(meter)
0
500
1000
1500
2000
2500

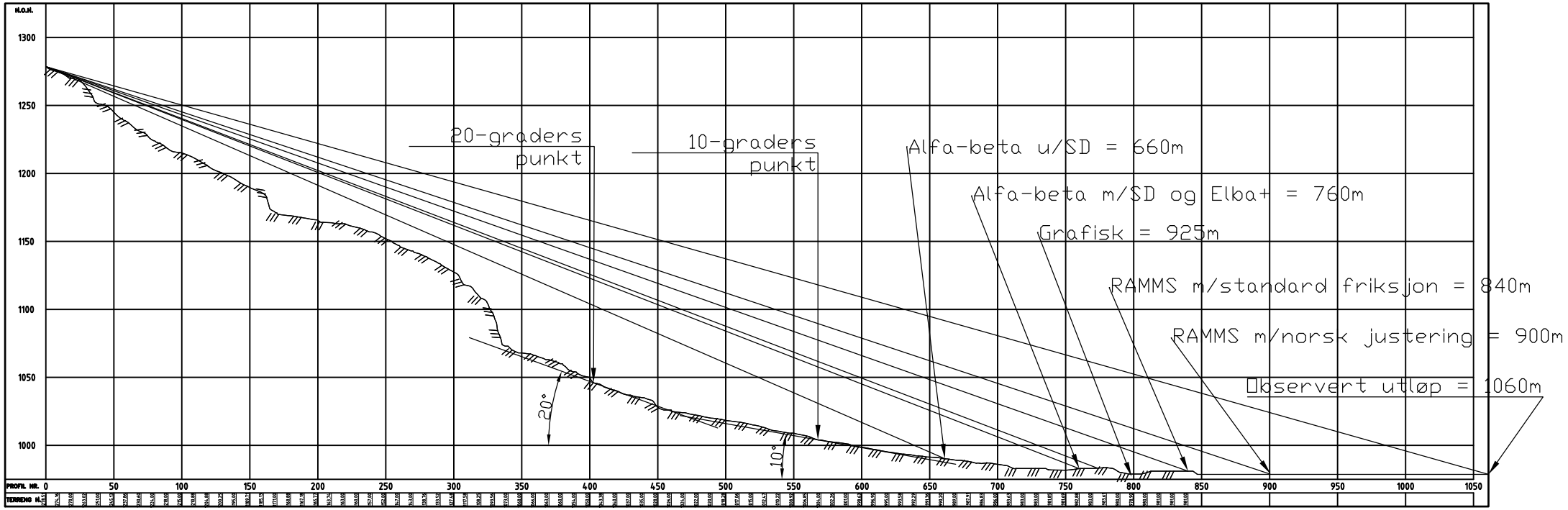

Beregning av nøyaktighet
Alfa - beta m/SD
y = 1,1161x - 142,61
R² = 0,9441
Beregnet utløpsdistanse(meter)
Observert utløpsdistanse(meter)
0
500
1000
1500
2000
2500


Beregning av nøyaktighet
Alfa – beta u/SD
y = 1,0283x – 151,33
R² = 0,9389
Beregnet utløpsdistanse(meter)
Observert utløpsdistanse(meter)
0
500
1000
1500
2000
2500


Beregning av nøyaktighet
Energilinje modell(0,4:1)
y = 0,8809x + 54,417
R² = 0,9305
Beregnet utløpsdistanse(meter)
Observert utløpsdistanse(meter)
0
500
1000
1500
2000
2500


Beregning av nøyaktighet
energilinje modell(0,35:1)
y = 0,9092x + 78,163
R² = 0,9477
Beregnet utløpsdistanse(meter)
Observert utløpsdistanse(meter)
0
500
1000
1500
2000
2500

Vedlegg 3 - eksempel på bestemmelse av utløpslengder langs et skredprofil



Rev.	Endring - erstatning	Dato	Sign.

Vedlegg til rapport:

Statens vegvesen

Målestokk: 1:4000 i A4

Boret:
Tegn: Gunne Håland
Saksb:
Ark.nr:

GRUNNUNDERSØKELSE:
Beregning av utløpslengder for Haukeli

XREF/DWG filnavn:

Tegn. nr.

Norges vassdrags- og energidirektorat

Middelthunsgate 29
Postboks 5091 Majorstuen
0301 Oslo

Telefon: 09575
Internett: www.nve.no