

Testing og vurdering av modellverktøy for dimensjonering av steinspranggerde

Ida Nord Myklebust



Masteroppgave i geovitenskap

Geofarer og geomekanikk

60 studiepoeng

Institutt for Geofag

Det matematisk- naturvitenskaplige fakultet

UNIVERSITETET I OSLO

[Mai/2023]

Testing og vurdering av modellverktøy for dimensjonering av steinspranggjerde

© Ida Nord Myklebust

2023

Testing og vurdering av modellverktøy for dimensjonering av steinspranggjerde

Ida Nord Mykebust

<http://www.duo.uio.no/>

Trykk: Reprosentralen, Universitetet i Oslo

Sammendrag

Denne masteroppgaven tar for seg bruk av modellverktøy for dimensjonering av steinspranggjerdet mot steinsprang. Målet med oppgaven er å kartlegge utvalgte modellverktøys egnethet, samt hvilken betydning valg av disse har for dimensjonering av sikringstiltak. Oppgaven omfatter en sensitivitetsanalyse for testing og sammenligning av utvalgte modellverktøy, og søker å avdekke i hvor stor grad valg av utvalgte modellverktøy kan føre til et vesentlig varierende resultat for total kinetisk energi og spranghøyde i dimensjonering av steinspranggerde. En sensitivitetsanalyse sier noe om hvor sensitiv eller robust en modell er for ulike justeringer av inngangsparametere. Modellverktøy som testes og sammenlignes er *RocFall2 v8.020* (RF), *Rockyfor3D v5.2* (RF3D), og *RAMMS Rockfall v1.7* (RR). Inngangsparametere som er studert er blokkvolum, blokkform og bakketype. I tillegg er det gjort simuleringer med "rapid automatic simulation" (RAS) i RF3D og lump mass i RF. To områder, Barstadvika og Hjelle i Vestland fylke, er valgt ut for å teste og sammenligne modellverktøyene. Avslutningsvis er modellenes brukeropplevelse og ytelse vurdert.

Resultatene i denne studien viser at valg av modellverktøy kan gi utslag på valg av høyde og energinivå på steinspranggerde. Valg av modell er derimot mindre avgjørende i studieområder som i hovedsak består av bratte og høye skrenter. Resultatene indikerer også at valg av modell er mindre avgjørende for fastsettelse av energimengde når det gjøres simuleringer med mindre blokker enn med større blokker. RF og RR viser høy sensitivitet for sfæreformet blokk. RF er den modellen som er mest sensitiv for justering av bakketype.

RF3D oppleves som robust og best egnet til bruk for dimensjonering av sikringstiltak. RF3D er den modellen som er mest stabil i resultatene og har gode muligheter for kalibrering av modell. Modellen tilbyr den billigste lisensprisen. RF3D produserer generelt lavere spranghøyder enn RF og RR.

RR oppleves som robust, men mindre egnet til bruk for dimensjonering av sikringstiltak. Modellen produserer generelt høyere spranghøyder enn RF og RF3D. Simuleringer med sfærisk blokk i RR anbefales ikke å bruke, da denne skiller seg markant ut med veldig lave verdier. RR har færre kalibreringsmuligheter og den dyreste lisensprisen. Man bør være oppmerksom på at modellen produserer generelt høyere spranghøyder enn RF og RF3D.

RF oppleves som mindre robust og mindre egnet til bruk for dimensjonering av sikringstiltak. RF produserte noe ustabile resultater ved justering av bakketype og er svært sensitiv for endringer i helningsgeometrien/terrenget. Modellen har mange innstillinger og parametere noe som krever utstrakt kunnskap og erfaring med bruk av modellen. Modellen har flere analysemuligheter av resultat som er spesifikt rettet mot dimensjonering av sikringstiltak, og tilbyr en relativt billig lisenspris.

Alt dette demonstrerer også viktigheten av at simuleringsverktøy alltid bør brukes sammen med feltobservasjoner, historiske opplysninger, skredfaglig kunnskap og skjønn, og at fagpersonens rolle er avgjørende i tolkning av resultater og dimensjonering av sikringstiltak.

Forord

Det er mange som har bidratt og kommet med innspill under arbeidet med denne oppgaven,

Først og fremst vil jeg takke mine veiledere Heidi Hefre (NGI) og Sebastian Westermann (UiO) for svar på alle spørsmålene jeg har stilt gjennom året og for konstruktive tilbakemeldinger underveis. Jeg vil også takke hele avdelingen på NGI, Snø og steinskred, som tok meg godt imot i forbindelse med arbeidet med denne masteroppgaven.

Jeg vil også takke mine søstre, Trine og Mari, for støtte og tilbakemeldinger i arbeid med teori og tolkning av resultat.

Til slutt ønsker jeg å rette en stor takk til min samboer Henrik, som har gjort det mulig for meg å fullføre masterløpet, og bidratt med gode tilbakemeldinger og gjennomlesning av oppgaven.

Innholdsfortegnelse

Testing og vurdering av modellverktøy for dimensjonering av steinspranggjerde.....	III
Sammendrag.....	VI
Forord.....	VII
Figurliste.....	XI
Tabelliste.....	XIV
Formelliste.....	XV
Forkortelser.....	XVI
1 Innledning.....	- 1 -
1.1 Relevans, problemstilling og mål.....	- 1 -
1.2 Oppbygging.....	- 3 -
2 Bakgrunn og teori.....	- 4 -
2.1 Håndtering av naturfarer.....	- 4 -
2.1.1 Relevante lover og aktører.....	- 4 -
2.1.2 Byggeteknisk forskrift (TEK17).....	- 5 -
2.1.3 Håndbok N200.....	- 6 -
2.1.4 Veiledere for dimensjonering av sikringstiltak.....	- 7 -
2.2 Steinsprang.....	- 8 -
2.2.1 Newtons lover og bevegelsesenergi.....	- 10 -
2.2.2 Blokkens bevegelsesformer.....	- 11 -
2.2.3 Friksjonskrefter.....	- 14 -
2.3 Fysiske sikringstiltak.....	- 15 -
2.3.1 Betongmurer og fangvoller.....	- 15 -
2.3.2 Steinspranggjerde.....	- 16 -
2.3.3 Dimensjonering av steinspranggjerde.....	- 17 -
2.4 Generelt om modellverktøy.....	- 20 -
2.4.1 Bruk av modellverktøy for dimensjonering av steinspranggjerder.....	- 20 -
2.4.2 Beregningsprinsipper.....	- 22 -
2.4.3 Restitusjonskoeffisient.....	- 22 -
2.5 Utvalgte modellverktøy.....	- 24 -
2.5.1 RAMMS Rockfall.....	- 24 -
2.5.2 Rockyfor3D.....	- 27 -

2.5.3	RocFall2	- 31 -
2.5.4	Sammenligning av modellene	- 35 -
3	Metode.....	- 38 -
3.1	Studieområder.....	- 38 -
3.1.1	Barstadvika.....	- 40 -
3.1.2	Hjelle	- 42 -
3.2	Feltarbeid	- 44 -
3.3	Modellering	- 45 -
3.3.1	Overordnet metodikk.....	- 45 -
3.3.2	RAMMS Rockfall simuleringsinnstillinger	- 46 -
3.3.3	Rockyfor3D simuleringsinnstillinger	- 47 -
3.3.4	Rocfall2 simuleringsinnstillinger	- 48 -
3.3.5	Sensitivitetsanalyse simuleringsinnstillinger	- 50 -
3.4	Databehandling av simuleringsresultat.....	- 51 -
3.5	Kvantitativ fremstilling av resultat fra ett gitt punkt langs profil.....	- 52 -
4	Resultater.....	- 54 -
4.1	Variasjon av blokkvolum.....	- 54 -
4.1.1	Resultat for kinetisk energi	- 54 -
4.1.2	Resultat for spranghøyder	- 56 -
4.2	Variasjon av blokkform	- 57 -
4.2.1	Resultat for kinetisk energi	- 57 -
4.2.2	Resultat for spranghøyder	- 58 -
4.3	Variasjon av bakketype	- 60 -
4.3.1	Resultat for kinetisk energi	- 60 -
4.3.2	Resultat for spranghøyder	- 62 -
4.4	Analysemodeller.....	- 63 -
4.4.1	Resultat for kinetisk energi	- 63 -
4.4.2	Resultat for spranghøyder	- 64 -
4.5	Simuleringsresultat i et gitt punkt langs profil	- 66 -
5	Diskusjon.....	- 68 -
5.1	Vurdering av sensitivitet.....	- 68 -
5.1.1	Påvirkningen av blokkvolum på total kinetisk energi og spranghøyder	- 68 -
5.1.2	Påvirkningen av blokkform på total kinetisk energi og spranghøyder.....	- 70 -

5.1.3	Påvirkningen av bakketype på total kinetisk energi og spranghøyder	- 72 -
5.1.4	Analysemodeller.....	- 73 -
5.1.5	Effekt av helningsgeometri	- 74 -
5.1.6	Er valg av modell avgjørende for dimensjoneringen?	- 76 -
5.2	Modellprestasjon for dimensjonering av steinspranggerde.....	- 77 -
5.3	Usikkerheter.....	- 80 -
5.4	Videre arbeid	- 81 -
6	Konklusjon	- 83 -
	Referanseliste	- 86 -
	Vedlegg	- 91 -
	Vedlegg A: Rådata av gjennomsnittlige total energi langs profil for alle simuleringer i Hjelle	- 91 -
	Vedlegg B: Rådata av gjennomsnittlig spranghøyde langs profil for alle simuleringer i Hjelle	- 95 -
	Vedlegg C: Rådata av gjennomsnittlig total energi langs profil for alle simuleringer i Barstadvika.....	- 99 -
	Vedlegg D: Rådata av gjennomsnittlig spranghøyde langs profil for alle simuleringer i Barstadvika.....	- 103 -

Figurliste

Figur 1: Registrert skred og nedfall på veg over hele Norge, fra perioden 2000-2019. Illustrasjon hentet fra statensvegvesen.no (SVV, 2019) med data fra Nasjonal veidatabank (NVDB).....	- 1 -
Figur 2: Klassifisering av skred fra fast fjell basert på skredstørrelse. Skred fra fast fjell fører til dannelse av ur i bunnen av fjellsiden. (Hardeng, 2023).	- 8 -
Figur 3: Velkjente former for utglidning av steinsprang "modes of failure". Plane, (b) wedge, (c) circular and (d) toppling -sliding (Babiker et al., 2014).....	- 9 -
Figur 4: Ulike former for blokkens bevegelse relatert til den gjennomsnittlige helningen på underlaget (Fanos & Pradhan, 2018) Modifisert fra Ritchie (1963).....	- 13 -
Figur 5: Blokkens innvirkning på mykt underlag ved sammenstøt hvor terrengdeformasjon ("scar") oppstår . Modellert i Ramms Rockfall ved bruk av en glideavhengig friksjonsparameter som er aktiv under blokk-bakke-interaksjonen og øker med varigheten av kontakten på grunn av akkumulering av materiale foran blokken under glidning. Bilde hentet fra brukermanualen til modellen (RAMMS, 2022).	- 15 -
Figur 6:Eksempel på steinspranggjerde. Vei i Ulvik sikret mot steinsprang ved bruk av gjerde produsert av Geobrugg. Bilde: Geobrugg.com.	- 16 -
Figur 7: Eksempel på steinspranggjerde. Steinspranggjerde over inngangsparti til tunell i Lensvik i Trøndelag. Gjerdet har en kapasitet på 8000 kJ og er 7 meter høyt. Bilde: Geobrugg.com.	- 17 -
Figur 8: Blokkens (blå sirkel) spranghøyde målt fra blokkens massesenter til enten normalt eller vertikalt på underlaget.	- 19 -
Figur 9: Konvertering av hastighet (V_1) i horisontalplanet (xy) og vertikalplanet (z) til normal hastighet (V_n) og tangentiell hastighet (V_t). W_1 er rotasjonshastighet. Modifisert figur fra Dorren (2016).	- 23 -
Figur 10: Kontaktpunkter mellom blokk (P) og terreng (Q) Bilde hentet fra Ramms Rockfall brukermanual (RAMMS, 2022).	- 24 -
Figur 11: Illustrasjon av hvordan bakkeruheten måles i Rocyfor3D (Dorren, 2016).	- 29 -
Figur 12: Studieområde Barstadvika.	- 38 -
Figur 13: Studieområde Hjelle.....	- 39 -
Figur 14: Lokalitet over studieområder. Barstadvika, Kinn kommune, i vest og Hjelle, Stryn kommune, i øst.	- 39 -
Figur 15: Helningsprofil fra Barstadvika og Hjelle.	- 40 -
Figur 16: Faresonekart over Barstadvika, og valgt utløsningspunkt og profil.	- 41 -
Figur 17: Helningskart over Barstadvika.	- 41 -
Figur 18: Observerte blokker fra felt i Barstadvika.	- 42 -
Figur 19: Fjellsiden i Barstadvika. Langs veien er det satt opp steinspranggjerde og tørrmur med skråning bak mot opprinnelig terreng. Bildet tatt i felt 3. oktober 2022.	- 42 -
Figur 20: Faresonekart over Hjelle, og valgt utløsningspunkt og profil.	- 43 -
Figur 21: Helningskart over Hjelle.	- 43 -
Figur 22: Observerte blokker fra felt i Hjelle.	- 44 -
Figur 23: Skutane, en langsgående brattkant i fjellsiden under Glomnesnakken som er kildeområde for steinsprang. Bilde: NGI (NGI, 2017a).	- 44 -
Figur 24: De tre modellene A) RAMMS Rockfall visualisert i ArcGIS, B) Rockyfor3D visualisert i ArcGIS, C) RocFall2 vist i RocFall2 programvaren. For RR og RF3D representerer fargene sprangbaner og ulike verdier for energinivå, vist i GIS. For RF representerer fargen kun sprangbaner.....	- 45 -
Figur 25: Eksempel på ubehandlet (blå kurver) og behandlet (rød kurver) data av simuleringsresultat for Ramms Rockfall i Hjelle.. Legende: RAMMS Rockfall (RR), simulering 1-3 (S1-S3), blokkvolum (1 m ³ , 5 m ³ og 10 m ³), blå symboler (gjennomsnittlig maks verdier). Bakgrunnsfarge (rød, oransje og gul) representerer faresoner for skred i Hjelle.	- 52 -

- Figur 26: Utvalgt punkt (rød linje) langs profil for kvantitativ fremstilling av resultat. Punktet representerer relevant plassering av sikringstiltak i Hjelle. Bakgrunnsfarge rød, oransje og gul viser faresoner for skred .- 53 -
- Figur 27: Utvalgt punkt (rød linje) langs profil for kvantitativ fremstilling av resultat. Punktet representerer relevant plassering av sikringstiltak i Barstadvika. Bakgrunnsfarge rød og gul viser faresoner for skred .- 53 -
- Figur 28: Resultater av gjennomsnittlig total kinetisk energi i Hjelle hvor blokkvolum er justert for de tre utvalgte modellverktøyene. Legende: RAMMS Rockfall (RR), Rockyfor3D (RF3D), RocFall2 (RF), simulering 1-3 (S1-S3), blokkvolum (1 m³, 5 m³ og 10 m³). Hver farge representerer modellverktøyet som er brukt hvor RR er blå, RF3D er rød og RF er grønn. Svart heltrukken linje representerer helningsprofilen hvor dataen er hentet ut fra. Bakgrunnsfarge (rød, oransje og gul) representerer faresoner for skred i Hjelle..... - 55 -
- Figur 29: Resultater av gjennomsnittlig total kinetisk energi i Barstadvika hvor blokkvolum er justert for de tre utvalgte modellverktøyene. Legende: RAMMS Rockfall (RR), Rockyfor3D (RF3D), RocFall2 (RF), simulering 1-3 (S1-S3), blokkvolum (1 m³, 5 m³ og 10 m³). Hver farge representerer modellverktøyet som er brukt hvor RR er blå, RF3D er rød og RF er grønn. Svart heltrukken linje representerer helningsprofilen hvor dataen er hentet ut fra. Bakgrunnsfarge (rød, oransje og gul) representerer faresoner for skred i Barstadvika - 55 -
- Figur 30: Resultater av gjennomsnittlig spranghøyder i Hjelle hvor blokkvolum er justert for de tre utvalgte modellverktøyene. Legende: RAMMS Rockfall (RR), Rockyfor3D (RF3D), RocFall2 (RF), simulering 1-3 (S1-S3), blokkvolum (1 m³, 5 m³ og 10 m³). Hver farge representerer modellverktøyet som er brukt hvor RR er blå, RF3D er rød og RF er grønn. Svart heltrukken linje representerer helningsprofilen hvor dataen er hentet ut fra. Bakgrunnsfarge (rød, oransje og gul) representerer faresoner for skred i Hjelle. - 56 -
- Figur 31: Resultater av gjennomsnittlig spranghøyde i Barstadvika hvor blokkvolum er justert for de tre utvalgte modellverktøyene. Legende: RAMMS Rockfall (RR), Rockyfor3D (RF3D), RocFall2 (RF), simulering 1-3 (S1-S3), blokkvolum (1 m³, 5 m³ og 10 m³). Hver farge representerer modellverktøyet som er brukt hvor RR er blå, RF3D er rød og RF er grønn. Svart heltrukken linje representerer helningsprofilen hvor dataen er hentet ut fra. Bakgrunnsfarge (rød og gul) representerer faresoner for skred i Barstadvika. - 57 -
- Figur 32: Resultater av gjennomsnittlig total kinetisk energi i Hjelle hvor blokkform er justert for de tre utvalgte modellverktøyene. Legende: RAMMS Rockfall (RR), Rockyfor3D (RF3D), RocFall2 (RF), simulering 1, 4 og 5 (S1, S4 og S5), blokkform (R = rektangel, S = sfære, E = ellipse). Hver farge representerer modellverktøyet som er brukt hvor RR er blå, RF3D er rød og RF er grønn. Svart heltrukken linje representerer helningsprofilen hvor dataen er hentet ut fra. Bakgrunnsfarge (rød, oransje og gul) representerer faresoner for skred i Hjelle. - 58 -
- Figur 33: Resultater av gjennomsnittlig total kinetisk energi i Barstadvika hvor blokkform er justert for de tre utvalgte modellverktøyene. Legende: RAMMS Rockfall (RR), Rockyfor3D (RF3D), RocFall2 (RF), simulering 1, 4 og 5 (S1, S4 og S5), blokkform (R = rektangel, S = sfære, E = ellipse). Hver farge representerer modellverktøyet som er brukt hvor RR er blå, RF3D er rød og RF er grønn. Svart heltrukken linje representerer helningsprofilen hvor dataen er hentet ut fra. Bakgrunnsfarge (rød og gul) representerer faresoner for skred i Barstadvika..... - 58 -
- Figur 34: Resultater av gjennomsnittlig spranghøyder i Hjelle hvor blokkform er justert for de tre utvalgte modellverktøyene. Legende: RAMMS Rockfall (RR), Rockyfor3D (RF3D), RocFall2 (RF), simulering 1, 4 og 5 (S1, S4 og S5), blokkform (R = rektangel, S = sfære, E = ellipse). Hver farge representerer modellverktøyet som er brukt hvor RR er blå, RF3D er rød og RF er grønn. Svart heltrukken linje representerer helningsprofilen hvor dataen er hentet ut fra. Bakgrunnsfarge (rød, oransje og gul) representerer faresoner for skred i Hjelle. - 59 -
- Figur 35: Resultater av gjennomsnittlig spranghøyder i Barstadvika hvor blokkform er justert for de tre utvalgte modellverktøyene. Legende: RAMMS Rockfall (RR), Rockyfor3D (RF3D), RocFall2 (RF), simulering 1, 4 og 5 (S1, S4 og S5), blokkform (R = rektangel, S = sfære, E = ellipse). Hver farge representerer modellverktøyet

- som er brukt hvor RR er blå, RF3D er rød og RF er grønn. Svart heltrukken linje representerer helningsprofilen hvor dataen er hentet ut fra. Bakgrunnsfarge (rød og gul) representerer faresoner for skred i Barstadvika..... - 60 -
- Figur 36: Resultater av gjennomsnittlig total kinetisk energi i Hjelle hvor bakketype er justert for de tre utvalgte modellverktøyene. Legende: RAMMS Rockfall (RR), Rockyfor3D (RF3D), RocFall2 (RF), simulering 1, 6 og 7 (S1, S6 og S7), bakketype (KT = kartlagt terreng, EH = ekstra hard, MH = medium hard). Hver farge representerer modellverktøyet som er brukt hvor RR er blå, RF3D er rød og RF er grønn. Svart heltrukken linje representerer helningsprofilen hvor dataen er hentet ut fra. Bakgrunnsfarge (rød, oransje og gul) representerer faresoner for skred i Hjelle..... - 61 -
- Figur 37: Resultater av gjennomsnittlig total kinetisk energi i Barstadvika hvor bakketype er justert for de tre utvalgte modellverktøyene. Legende: RAMMS Rockfall (RR), Rockyfor3D (RF3D), RocFall2 (RF), simulering 1, 6 og 7 (S1, S6 og S7), bakketype (KT = kartlagt terreng, EH = ekstra hard, MH = medium hard). Hver farge representerer modellverktøyet som er brukt hvor RR er blå, RF3D er rød og RF er grønn. Svart heltrukken linje representerer helningsprofilen hvor dataen er hentet ut fra. Bakgrunnsfarge (rød og gul) representerer faresoner for skred i Barstadvika..... - 61 -
- Figur 38: Resultater av gjennomsnittlig spranghøyder i Hjelle hvor bakketype er justert for de tre utvalgte modellverktøyene. Legende: RAMMS Rockfall (RR), Rockyfor3D (RF3D), RocFall2 (RF), simulering 1, 6 og 7 (S1, S6 og S7), bakketype (KT = kartlagt terreng, EH = ekstra hard, MH = medium hard). Hver farge representerer modellverktøyet som er brukt hvor RR er blå, RF3D er rød og RF er grønn. Svart heltrukken linje representerer helningsprofilen hvor dataen er hentet ut fra. Bakgrunnsfarge (rød, oransje og gul) representerer faresoner for skred i Hjelle..... - 62 -
- Figur 39: Resultater av gjennomsnittlig spranghøyder i Barstadvika hvor bakketype er justert for de tre utvalgte modellverktøyene. Legende: RAMMS Rockfall (RR), Rockyfor3D (RF3D), RocFall2 (RF), simulering 1, 6 og 7 (S1, S6 og S7), bakketype (KT = kartlagt terreng, EH = ekstra hard, MH = medium hard). Hver farge representerer modellverktøyet som er brukt hvor RR er blå, RF3D er rød og RF er grønn. Svart heltrukken linje representerer helningsprofilen hvor dataen er hentet ut fra. Bakgrunnsfarge (rød og gul) representerer faresoner for skred i Barstadvika..... - 63 -
- Figur 40: Resultater av gjennomsnittlig total kinetisk energi i Hjelle med ulike analysemodeller for RF3D og RF. Legende: Rockyfor3D (RF3D), RocFall2 (RF), simulering 1 og 8 (S1, S8), kartlagt terreng (KT), rapid automatic simulation (RAS), rigid body (RB), lump mass (LM). Hver farge representerer modellverktøyet som er brukt hvor RF3D er rød og RF er grønn. Svart heltrukken linje representerer helningsprofilen hvor dataen er hentet ut fra. Bakgrunnsfarge (rød, oransje og gul) representerer faresoner for skred i Hjelle... - 64 -
- Figur 41: Resultater av gjennomsnittlig total kinetisk energi i Barstadvika med ulike analysemodeller for RF3D og RF. Legende: Rockyfor3D (RF3D), RocFall2 (RF), simulering 1 og 8 (S1, S8), kartlagt terreng (KT), rapid automatic simulation (RAS), rigid body (RB), lump mass (LM). Hver farge representerer modellverktøyet som er brukt hvor RF3D er rød og RF er grønn. Svart heltrukken linje representerer helningsprofilen hvor dataen er hentet ut fra. Bakgrunnsfarge (rød og gul) representerer faresoner for skred i Barstadvika. - 64 -
- Figur 42: Resultater av gjennomsnittlig spranghøyde i Hjelle hvor det er kjørt simuleringer med ulike analysemodeller for RF3D og RF. Legende: Rockyfor3D (RF3D), RocFall2 (RF), simulering 1 og 8 (S1, S8), kartlagt terreng (KT), rapid automatic simulation (RAS), rigid body (RB), lump mass (LM). Hver farge representerer modellverktøyet som er brukt hvor RF3D er rød og RF er grønn. Svart heltrukken linje representerer helningsprofilen hvor dataen er hentet ut fra. Bakgrunnsfarge (rød, oransje og gul) representerer faresonene for skred i Hjelle..... - 65 -
- Figur 43: Resultater av gjennomsnittlig spranghøyde i Barstadvika hvor det er kjørt simuleringer med ulike analysemodeller for RF3D og RF. Legende: Rockyfor3D (RF3D), RocFall2 (RF), simulering 1 og 8 (S1, S8), kartlagt terreng (KT), rapid automatic simulation (RAS), rigid body (RB), lump mass (LM). Hver farge representerer modellverktøyet som er brukt hvor RF3D er rød og RF er grønn. Svart heltrukken linje

representerer helningsprofilen hvor dataen er hentet ut fra. Bakgrunnsfarge (rød og gul) representerer faresonene for skred i Barstadvika. - 65 -

Tabelliste

Tabell 1: Sikkerhetsklasser ved plassering av byggverk i skredfareområde (Sikkerhet mot skred, 2022, § 7-3).	- 5 -
Tabell 2: Sikkerhetsklasser og preaksepterte ytelser i TEK17 (Direktoratet for byggkvalitet, 2021).	- 6 -
Tabell 3: Sikkerhetskrav for skredsannsynlighet på veg (SVV, 2022, kap. 1.7).	- 7 -
Tabell 4: Energiklasser med MEL og SEL gitt av EAD 340059-00-0106/ETAG 027.	- 18 -
Tabell 5: Klassifisering for resthøyde av steinspranggjerdet etter treff hvor MEL er dimensjonerende (EOTA, 2018).	- 20 -
Tabell 6: Inngangsparametere i RR (RAMMS, 2022).	- 26 -
Tabell 7: Inngangsparametere i RF3D (Dorren, 2016).	- 28 -
Tabell 8: Oversikt over bakketyper i RF3D og tilhørende Normal restitusjonskoeffisient verdier (R_n) (Dorren, 2016).	- 30 -
Tabell 9: Oversikt over relevante resultatfiler for dimensjonering av tiltak i RF3D (Dorren, 2016).	- 31 -
Tabell 10: Hovedforskjell mellom lump mass og rigid body i RocFall2 (RF) (Rocscience, 2023b).	- 32 -
Tabell 11: Hovedforskjeller mellom RAMMS Rockfall, Rockyfor3d og RocFall2.	- 35 -
Tabell 12: RR terrengparametere basert på kartlagt terreng i Barstadvika.	- 47 -
Tabell 13: RR terrengparametere basert på kartlagt terreng i Hjelle.	- 47 -
Tabell 14: RF3D terrengparametere (Bakke type og Ruhet) basert på kartlagt terreng i Barstadvika.	- 47 -
Tabell 15: RF3D terrengparametere (Bakke type og Ruhet) basert på kartlagt terreng i Hjelle.	- 48 -
Tabell 16: RocFall, rigid body, terrengparametere basert på kartlagt terreng i Barstadvika. R_n er normal restitusjonskoeffisient, R_t er tangentiell restitusjonskoeffisient, ϕ_D er dynamisk friksjon og ϕ_R er rullende friksjon. Standardavviket (σ) til normalfordelingen er oppgitt i parentes.	- 49 -
Tabell 17: RocFall, rigid body, terrengparametere basert på kartlagt terreng i Hjelle. Standardavviket (σ) til normalfordelingen er oppgitt i parentes. R_n er normal restitusjonskoeffisient, R_t er tangentiell restitusjonskoeffisient, ϕ_D er dynamisk friksjon og ϕ_R er rullende friksjon.	- 49 -
Tabell 18: RocFall, lump mass, terrengparametere basert på kartlagt terreng i Barstadvika. R_n er normal restitusjonskoeffisient, R_t er tangentiell restitusjonskoeffisient. Standardavviket (σ) til normalfordelingen er oppgitt i parentes.	- 49 -
Tabell 19: RocFall, lump mass, terrengparametere basert på kartlagt terreng i Hjelle. R_n er normal restitusjonskoeffisient, R_t er tangentiell restitusjonskoeffisient. Standardavviket (σ) til normalfordelingen er oppgitt i parentes.	- 50 -
Tabell 20: Simuleringsinnstillinger brukt i sensitivitetsanalysen for modellverktøyene Ramms rockfall (RR), RocFall2 (RF) og Rockyfor3d (RF3D) i studieområdene Hjelle og Barstadvika. KT er kartlagt terreng fra felt. I simulering 8 er det kjørt med rapid automatic simulation (RAS) i RF3D og lump mass i RF.	- 51 -
Tabell 21: Simuleringsresultater fra Hjelle, av data hentet ut fra ett punkt langs profil i faresone 1/100. RR = RAMMS Rockfall, RF3D = Rockyfor3D, RF = RocFall2, KT = kartlagt terreng, LM = lump mass i RF, RAS = rapid automatic simulation i RF3D.	- 66 -
Tabell 22: Simuleringsresultater fra Barstadvika, av data hentet ut fra ett punkt langs profil i faresone 1/100. RR = RAMMS Rockfall, RF3D = Rockyfor3D, RF = RocFall2, KT = kartlagt terreng, LM = lump mass i RF, RAS = rapid automatic simulation i RF3D.	- 67 -
Tabell 23: En oversikt av opplevd modellytelse til bruk for dimensjonering av steinspranggjerdet Grønn: oppleves som en fordel. Rød: Oppleves som en ulempe. Oransje: oppleves som både en fordel og en ulempe. RAS = Rapid automatic simulation.	- 77 -

Formelliste

Formel 1: Et punktformet objekts treghetsmoment (I) om en akse med masse (m) og avstand (r) fra aksen til objektet.	- 10 -
Formel 2: Newtons andre lov. Summen av kreftene (F) som virker på objektet med masse (m) og akselerasjon (a).....	- 10 -
Formel 3: Impuls (i) er endring i bevegelsesmengde (p) hvor m er massen til objektet og v er hastigheten til objektet.	- 11 -
Formel 4: Kinetisk energi (Ek), også kallet bevegelsesenergi, til et objekte med masse (m) og hastighet (v).- 11 -	- 11 -
Formel 5: Kinetisk energi (Ek) til et objekt i rotasjon med treghetsmoment (I) og vinkelhastighet (ω).	- 11 -
Formel 6: Generell formel for friksjon hvor R er friksjonskraften, μ er friksjonskoeffisienten og N er normalkraften.....	- 14 -
Formel 7: Restitusjonskoeffisient (R). V_u er utgående hastighet og V_i er innkommende hastighet.	- 23 -
Formel 8: Normal Restitusjonskoeffisient (R_n) i RocFall2 med lump mass analysemodell. $V_{n,u}$ er utgående normal hastighet og $V_{n,i}$ er innkommende normal hastighet.....	- 33 -
Formel 9: Tangentiell Restitusjonskoeffisient (R_t) i RocFall2 med lump mass analysemodell. $V_{t,u}$ er utgående tangentiell hastighet og $V_{t,i}$ er innkommende tangentiell hastighet.....	- 33 -
Formel 10: Friksjonvinkel (ϕ) i RocFall2 med lump mass analysemodell dersom "calculate friction angle from R_t " er aktivert. R_t er tangentiell restitusjonskoeffisient (Rocscience, 2023b).....	- 33 -
Formel 11: Normal Restitusjonskoeffisient (R_n) i RocFall2 med rigid body analysemodell. Hvor E_u er utgående energi og E_i er innkommende energi.	- 34 -

Forkortelser

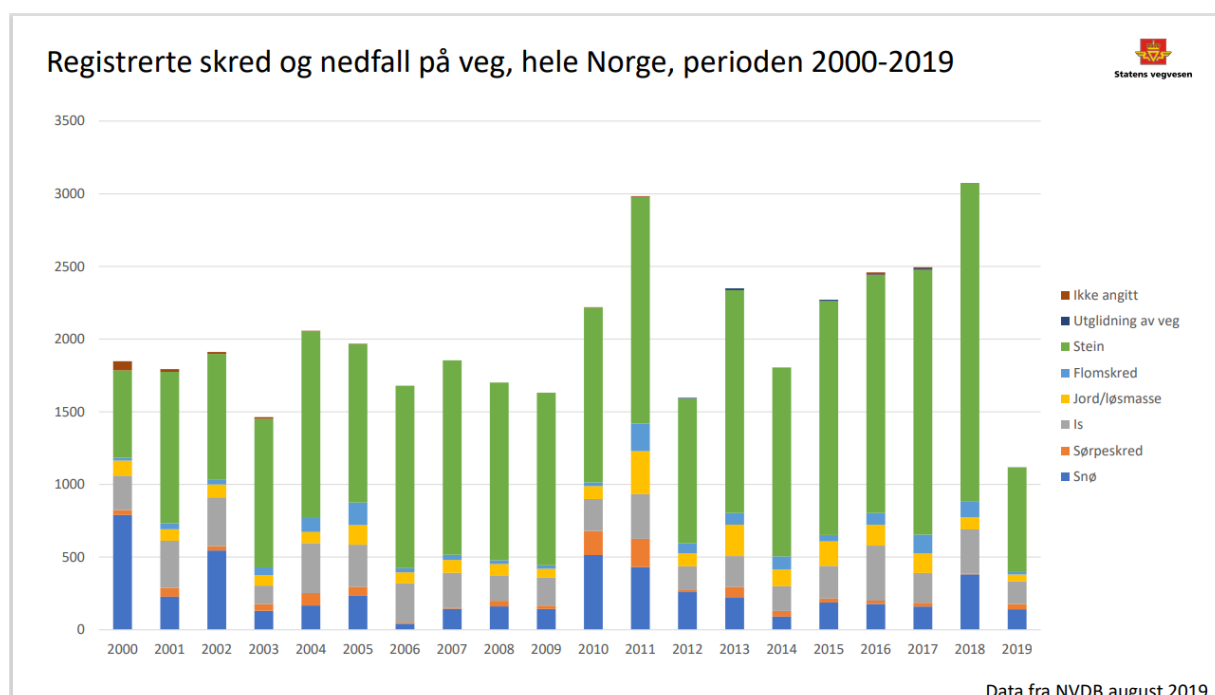
NGI	Norges geotekniske institutt
NVE	Norges vassdrag og energidirektorat
SVV	Statens vegvesen
RR	RAMMS Rockfall
RF	RocFall2
RF3D	Rockyfor3D
TEK17	Byggteknisk forskrift år 2017
TEK10	Byggteknisk forskrift år 2010
R	Restitusjonskoeffisient
Rn	Normal restitusjonskoeffisient
Rt	Tangentiell restitusjonskoeffisient
Resultatfiler	Utgangsparametere som modellverktøy produserer
Design parametere	Spranghøyde- og energiverdier fra resultatfiler som brukes videre til dimensjonering av sikringstiltak
RAS	"Rapid Automatic Simulation" i Rockyfor3D
GIS	Geografisk informasjonssystem (programvare)
DEM	Digital terrengmodell
φ_D	Dynamisk friksjon
φ_R	Rullende friksjon

1 Innledning

1.1 Relevans, problemstilling og mål

Norge er beriket med høye fjell, dype daler og lange fjorder, men som konsekvens fører dette med seg fare for steinsprang og andre naturfarer. Steinsprang er uforutsigbare og vanskelig å varsle, og når de først forekommer er det liten tid til evakuering (Volkwein et al., 2011). Sammenlignet med andre naturfarer rammer ikke steinsprang store områder, de har derimot høy intensitet og kan derfor føre til store ødeleggelses og i verste fall fatale konsekvenser (Volkwein et al., 2011; Dorren, 2003).

Figur 1 viser en oversikt over registrerte skred på vei i Norge som forekommer både naturlig eller fra veiskjæringer (SVV, 2019). Byggteknisk forskrift (TEK17) (Sikkerhet mot skred, 2022, § 7-3), og Håndbok N200 (SVV, 2022) stiller strenge krav til sikring av bebyggelse og veinett mot naturfarer. Samtidig er det en antatt økning av fremtidig steinsprangaktivitet i Norge grunnet klimaendringer (Bjørndal, 2011). I Nasjonal transportplan for 2022 til 2033 står det at transportsektoren må være forberedt på å forebygge og håndtere større og hyppigere naturhendelser (Samferdselsdepartementet, 2021). Dette gir et generelt økt behov for sikring mot naturfarer ved bebyggelser og langs veinettet i Norge.



Figur 1: Registrert skred og nedfall på veg over hele Norge, fra perioden 2000-2019. Illustrasjon hentet fra statensvegvesen.no (SVV, 2019) med data fra Nasjonal veidatabank (NVDB).

Ved vurdering av sikringstiltak er både risiko og økonomi sentrale aspekter i beslutningsprosessen, og generelt vil større grad av sikkerhet føre til mer omfattende sikringstiltak og økte kostnader. Det er derfor vesentlig at valg og design av sikringstiltak tas

på godt grunnlag. Antagelse om blokkens størrelse, hastighet og spranghøyde brukes ved dimensjonering av sikringstiltak. Når disse størrelsene er fastlagt kan man beregne den kinetiske energien til blokken, og ut fra dette beregne styrke og høyde på sikringstiltaket (Domaas & Grimstad, 2014). På grunn av steinsprangprosessens kompleksitet er modellverktøy et nødvendig hjelpemiddel for dimensjonering av sikringstiltak. Modellverktøy kan simulere blokkens sprangbaner, bevegelsesformer og beregne ulike størrelser (e.g energi og spranghøyde), men bruk av modellverktøy forutsetter god forståelse av verktøyet og kunnskap om området som skal sikres.

I Norge i dag er bruken av modellverktøy for dimensjonering av sikringstiltak mot steinsprang i stor grad erfaringsbasert, og praksisen varierer mellom ulike aktører. Norges vassdrag- og energidirektorat (NVE) arbeider med en ny og digital helhetlig forvaltningsmodell for skred- og flomskadeforebygging, "Sikringshåndboka" (NVE, 2023, ikke publisert). Delen som tar for seg skred i bratt terreng omtaler bruk av modellverktøy, men valg av modellverktøy er derimot ikke diskutert og er opp til den skredkyndige å vurdere.

Denne masteroppgaven tester og sammenligner utvalgte modellverktøy til bruk for dimensjonering av steinspranggjerde mot steinsprang. De utvalgte modellverktøyene er listet opp under og er blant de mest brukte for skredutredning av steinsprang i Norge (Hefre & Mo, 2020).

- *RocFall2 v8.020 (RF)* (Rocscience, 2023e)
- *Rockyfor3D v5.2 (RF3D)* (Dorren, 2016)
- *RAMMS Rockfall v1.7 (RR)* (RAMMS, 2022)

Målet med masteroppgaven er å styrke kunnskapsgrunnlaget for valg og bruk av modellverktøy til dimensjonering av fysiske sikringstiltak i utløpssonen mot steinsprang. Oppgaven sikter på å gi verdifull informasjon om betydningen av disse valgene, og å være relevant for NVEs arbeid med Sikringshåndboka. Forhåpentligvis kan resultatene fra oppgaven føre til økt sikkerhet i utsatte områder, samt kostnadsbesparelser i prosjekt ved å redusere sannsynligheten for feil eller overdimensjonering av sikringstiltaket.

1.2 Oppbygging

Oppgaven tar først for seg relevant bakgrunn og teori innen steinsprang, sikringstiltak og bruk av modellverktøy. Deretter er utvalgte studieområder og modellverktøy beskrevet.

For å undersøke problemstillingene i oppgaven er to studieområder med ulik helningsprofil valgt ut for å kjøre steinsprangsimuleringer. Studieområdene er lokalisert på vestlandet i Hjelle (Stryn kommune) og Måløy (Kinn kommune).

For å teste og vurdere de utvalgte modellverktøyene er en sensitivitetsanalyse av relevante inngangsparametere for hver av modellene gjennomført. Sensitivitetsanalysen søker å avdekke i hvor stor grad valg av modellverktøy og justering av inngangsparametere kan føre til betydelig varierende resultat av kritiske dimensjoneringsparametere på sikringstiltaket.

Simuleringsresultater som vurderes er parameterne spranghøyde og total kinetisk energi, siden disse er primære parametere brukt for dimensjonering av sikringstiltak.

Avslutningsvis er praktiske fordeler og ulemper av modellene og dens opplevde ytelse vurdert, som lisenspris, lisenstype, simuleringstid, brukervennlighet, robusthet og analysemuligheter av resultat.

2 Bakgrunn og teori

2.1 Håndtering av naturfarer

Håndtering av naturfarer baseres på Norges lover og forskrifter. Dette delkapittelet belyser relevante lovverk, forskrifter, aktører og veiledere for håndtering av naturfarer i Norge.

2.1.1 Relevante lover og aktører

Plan og bygningsloven sier at "Grunn kan bare bebygges, eller eiendom opprettes eller endres, dersom det er tilstrekkelig sikkerhet mot fare eller vesentlig ulempe som følge av natur- eller miljøforhold. [...]" (Byggegrunn miljøforhold mv, 2022, § 28-1). I følge stortingsmelding 15 er det kommunens ansvar at naturfarer, herunder fare for flom og skred, blir vurdert og tatt tilstrekkelig hensyn til i arealplanlegging og byggesaksbehandling (Olje- og Energidepartementet, 2012).

Veglova sier at planlegging av riksvei, fylkesvei og kommunal vei skal skje etter reglene om planlegging i plan- og bygningslov (Planlegging, 2021, § 12), og dette vil si at relevante krav i TEK 17 som er underordnet Plan- og bygningsloven må følges. Vegtrafikkloven sier at det er fylkeskommunens ansvar å tilrå og samordne tiltak for å fremme trafikksikkerheten i fylket (Ansvar for trafikksikkerhetsarbeid, 2022, § 40 a).

Veimyndighetene har det overordnede ansvaret for sikkerheten langs veinettet i Norge. For riksvei og fylkesvei tok fylkeskommunene året 2020 over det fulle ansvar for fylkesveier (Elvik, 2022; Vegstyremaktene, 2019, § 9 og § 10). Dette innebærer å forebygge og håndtere flom og skredrisiko innenfor sin sektor (Olje- og Energidepartementet, 2012). Kostnader til skredsikringstiltak dekkes av staten for riksvei, fylkeskommune for fylkesvei og kommune for kommunal vei (Elvik, 2022).

Norges vassdrag- og energidirektorat (NVE) har det overordnede ansvaret for statlige forvaltningsoppgaver med forebygging mot skredulykker (NVE, 2023). Dette arbeidet omfatter rådgiving og støtte til kommuner og samfunnet forøvrig med kompetanse og ressurser innen skredfarekartlegging, arealplanlegging, sikring, overvåking, varsling, og beredskap.

Stortingsmelding 15 formidler en oversikt over ansvarlige og relevante aktører, samt hvilke roller de har for håndtering av naturfarer (Olje- og Energidepartementet, 2012). Kort oppsummert er det den enkelte innbygger, grunneier og eier av bygninger og infrastruktur som har et ansvar for å sikre seg selv og egen eiendom. Aktører som bistår med faglig kompetanse er, blant andre, Norges geotekniske institutt (NGI), Norges geologiske undersøkelse (NGU), Multiconsult, SWECO, Rambøll, Norconsult og Skred AS.

2.1.2 Byggeteknisk forskrift (TEK17)

TEK17 er underordnet Plan- og bygningsloven og beskriver hvilke tekniske krav et byggverk må ha for å kunne oppføres lovlig i Norge. TEK17 omfatter krav for sikkerhet mot naturpåkjenninger, herunder sikkerhet mot skred. Forskriften sier at byggverk hvor konsekvensen av skred er stor ikke skal plasseres i skredfarlig område (Sikkerhet mot skred, 2022, § 7-3). Videre krever den at alle byggverk i skredfareområde skal fastsettes i sikkerhetsklasser for skred (Sikkerhet mot skred, 2022, § 7-3). Sikkerhetsklassene er inndelt etter sannsynlighet for og konsekvens av skred og oppgis som den største nominelle årlige sannsynligheten (Tabell 1), det vil si sannsynligheten for skredskader av betydning med en intensitet som kan medføre fare for liv, helse eller større materiell (Direktoratet for byggkvalitet, 2021). Med nominell menes det at sannsynlighet er en antatt verdi der det i tillegg til teoretiske beregningsmetoder brukes faglig skjønn. Sannsynligheten sier ingenting om når en slik skredhendelse vil forekomme, det vil si at eksempelvis to skred med årlig nominell sannsynlighet på 1/100 kan forekomme med kort tids mellomrom. Den årlige nominelle sannsynligheten refereres ofte som gjentakintervall eller returperiode for skred. Et skred med årlig nominell sannsynlighet på 1/100 har eksempelvis et gjentakintervall eller returperiode på 100 år.

Tabell 1: Sikkerhetsklasser ved plassering av byggverk i skredfareområde (Sikkerhet mot skred, 2022, § 7-3).

Sikkerhetsklasse for skred	Konsekvens	Største nominelle årlige sannsynlighet
1	Liten	1/100
2	Medium	1/1000
3	Stor	1/5000

NVE og andre relevante aktører utarbeider faresonekart for skred i bratt terreng, og kartene angir faresoner etter sikkerhetsklassene i TEK17. Faresoner i kart er som regel markert med fargene rød, oransje og gul. TEK17 med veileder (Direktoratet for byggkvalitet, 2021) beskriver preaksepterte ytelser for plassering av byggverk i sikkerhetsklassene (Tabell 2). Sikkerhetskravene oppfylles enten ved å plassere byggverket utenfor faresonene slik at sannsynligheten for skred er mindre enn minstekravet i forskriften, eller ved å utføre sikringstiltak for å redusere sannsynligheten for skred mot byggverket og tilhørende uteareal.

Veilederen "Utredning av sikkerhet mot skred i bratt terreng" (NVE, 2020) beskriver hvordan man skal svare ut sikkerhetskravene knyttet til TEK17 § 7-3, og omfatter retningslinjer innen kartlegging av skredfare for ulike skredtyper i forbindelse med reguleringsplan og byggesak.

Tabell 2: Sikkerhetsklasser og preaksepterte ytelser i TEK17 (Direktoratet for byggkvalitet, 2021).

Sikkerhetsklasser	Beskrivelse av tillatte byggverk	Eksempler på tillatte byggverk
1	Byggverk der det normalt ikke oppholder seg personer Konsekvens: der det er små økonomiske eller andre samfunnsmessige konsekvenser.	Garasje, uthus og båtnaust, Mindre brygger og lagerbygninger med lite personopphold
2	Byggverk der det normalt ikke oppholder seg mer enn 25 personer Konsekvens: der det er middels økonomiske eller andre samfunnsmessige konsekvenser.	Enebolig, tomannsbolig og enhetsbolig/rekkehus/fritidsboliger med maksimum 10 boenheter. Arbeid og publikumsbygg hvor det normalt oppholder seg mindre enn 25 personer. Unntak: Byggverk som krever et høyere sikkerhetsnivå med hensyn til personsikkerhet (Sykehjem, skoler, barnehager) inngår i sikkerhetsklasse 3 Driftsbygning i landbruket Parkeringshus og havneanlegg
3	Byggverk hvor det normalt oppholder seg mer enn 25 personer Konsekvens: der det er større økonomiske eller andre samfunnsmessige konsekvenser.	Eneboliger i kjede/rekkehus/boligblokk/fritidsbolig med mer enn 10 boenheter Arbeids- og publikumsbygg/brakkertigg/overnattingsted hvor det normalt oppholder seg mer enn 25 personer Skole, barnehage, sykehjem og lokal beredskapsinstitusjon

2.1.3 Håndbok N200

I veiprosjekter med skredfare bestemmes sikkerhetsnivå for skred på vei i henhold til Håndbok N200 (SVV, 2022, kap. 1.7). Sikkerhetsnivåene angir hvilken sannsynlighet for skred på vei (restrisiko) som aksepteres og er vist i Tabell 3. Valg av sikkerhetsnivå avgjøres for hvert enkelt veiprojekt hvor det tas utgangspunkt i samlet skredsannsynlighet per kilometer vei og dimensjonerende trafikkmengde. Kravene er en tilpasning av sikkerhetskravene i TEK17 og gjelder for strekninger hvor trafikken normalt er i flyt. Ved utbedringstiltak på eksisterende vei anbefales sikkerhetsnivået å være som for ny vei. På områder hvor det tilrettelegges for stans, som for eksempel oppstillingsplasser og rasteplasser,

gjelder sikkerhetskravene i TEK17. Videre refererer sikringshåndboka til rapporten *Sikring av veger mot steinskred* Bjørdal (2011), for beskrivelser av sikringstiltak.

Tabell 3: Sikkerhetskrav for skredsannsynlighet på veg (SVV, 2022, kap. 1.7).

Dimensjonerende trafikkmengde	Samlet skredsannsynlighet per km og år
< 500	1/20
500 – 3999	1/50
4000 – 5999	1/100
6000-11999	1/300
≥ 12000	1/1000

2.1.4 Veiledere for dimensjonering av sikringstiltak

Veiledning for design, vedlikehold og bruk av fysiske sikringstiltak har vært mangelfull i bransjen på verdensbasis, men i de siste årene har noe av behovet blitt møtt. Etter Canterbury jordskjelvet i New Zealand i 2011 økte oppmerksomheten rundt sikring av steinsprang i regionen. Jordskjelvet avdekket at det var behov for mer konsistent og pålitelig design av sikringsstrukturer. På bakgrunn av dette ble det utarbeidet en veileder for design av fysiske sikringstiltak i skredbanen (MBIE, 2017). I 2013 utarbeidet Østerrikes Standard Institutt (ØSI) en veileder med fokus på planlegging, design og vedlikehold av ulike sikringstiltak (ØSI, 2021). Etter fire år med forskning publiserte det nasjonale prosjektet C2ROP i Frankrike en veileder med anbefalinger innen blant annet design, overvåking og bruk av sikringsbarrierer (C2ROP, 2020). I Norge utarbeidet Statens vegvesen, på grunnlag av ulike praksis fra region til region, og tidligere mangler eller feil ved prosjektering av steinspranggjerdje, en erfaringsrapport om oppsett av steinspranggjerdje (SVV, 2020). Utover dette henviser SVV til rapporten "Sikring av veger mot steinskred" (Bjørdal, 2011) for informasjon om bruk av ulike sikringstiltak mot steinsprang langs veinettet i Norge.

Sikringshåndboka

NVE arbeider med en ny veileder navngitt "Sikringshåndboka" (NVE, 2023, ikke publisert). Sikringshåndboka skal være en helhetlig digital forvaltningsmodell for skred og flomforebygging. Den er beregnet for prosjekterende, utførende eller øvrige som jobber med flom og skred i kommunen eller andre steder. Veilederen er delt inn i tre temaer: Flom og erosjon, Kvikkleireskred, og Skred i bratt terreng. Sistnevnte er per nå under arbeid og ikke publisert, men skal gi veiledning i alle faser i sikringsprosessen, fra planlegging av sikring til ferdigstilt tiltak. Vedrørende bruk av modellverktøy for dimensjonering av steinspranggjerdje formidler sikringshåndboka en overordnet fremgangsmåte hvor anbefalinger og utfordringer er belyst, og vil blant annet ta for seg følgende temaer:

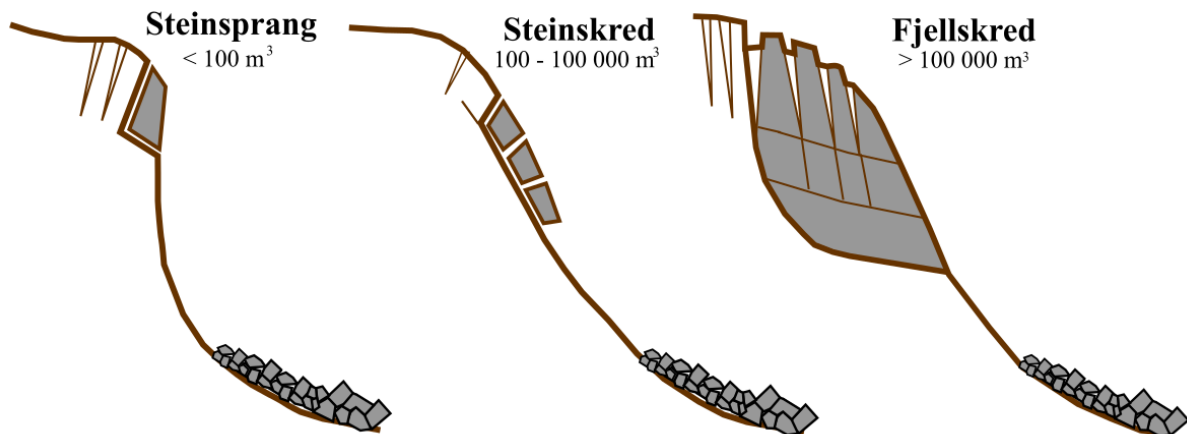
- Komponenter i et steinspranggjerdje

- Plassering av steinspranggjerd
- Parameterkalibrering av modellverktøy
- Restrisiko/faresoner i ettertid

Valg av modellverktøy er ikke diskutert og er opp til den skredkyndige å vurdere. Denne masteroppgaven søker å bidra til å styrke kunnskapsgrunnlaget for valg og bruk av modellverktøy til dimensjonering av steinspranggjerd.

2.2 Steinsprang

I Norge finnes det mange betegnelser for skred, men ordet "skred" brukes i store deler av landet for alle slags typer utglidninger (Jørstad, 1979). Betegnelsen av ulike skredtyper i Norge baserer seg på materialets art og bevegelsehastigheten, med eksempler som jordskred, flomskred og steinsprang (Jørstad, 1979). Videre inndeles skred bestående av fast fjell ut ifra størrelsen på skredet (Hardeng, 2023), som vist i Figur 2. Skred av steinmasser med volum under 100 m^3 kalles for steinsprang, volum mellom 100 og $100\,000 \text{ m}^3$ kalles for steinskred, og volum over $100\,000 \text{ m}^3$ kalles for fjellskred



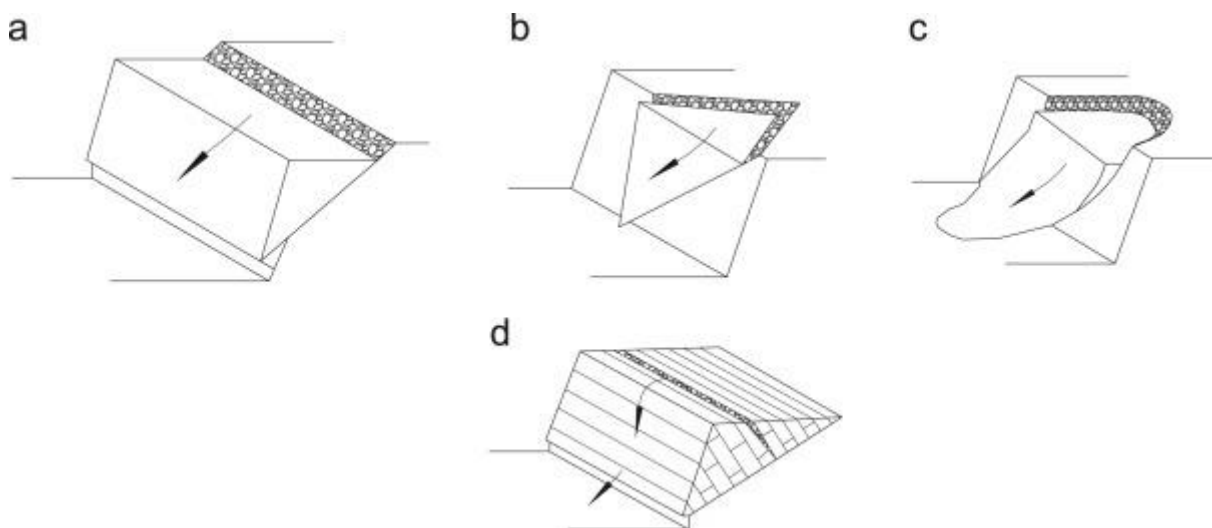
Figur 2: Klassifisering av skred fra fast fjell basert på skredstørrelse. Skred fra fast fjell fører til dannelse av ur i bunnen av fjellsiden. (Hardeng, 2023).

Ordet sprang brukes bare i forbindelse med steinsprang og Jørstad (1979) definerer steinsprang som "Overflateoppsprukket fjell som ved utløsning glir, triller, hopper eller faller, oftest med stor fart, volum vanligvis $< 100 \text{ m}^3$." (Jørstad, 1979, s. 5).

Å forstå og identifisere karakteristiske trekk som dannes i områder med steinsprangaktivitet er vesentlig i arbeid med steinsprang og sikringstiltak. Ved foten av bratte fjellsider kan man se tegn på tidligere steinsprangaktivitet ved at blokker er avsatt og danner en såkalt talus eller ur (Figur 2). Ur er som regel naturlig sortert etter størrelse på blokkene, hvor de minste ligger høyest oppe og de største ligger lengst nede ved foten av uren. En av grunnene til denne sorteringseffekten er at den totale energien til små blokker er lavere enn større blokker

(Dorren, 2003). Steinsprang kan også forekomme hvor spor av tidligere steinsprangaktivitet er mindre tydelig, hvor terrenget gjerne er dekket av vegetasjon (Dorren, 2003). Ved å studere uren får man informasjon om blokkstørrelser, blokkutforming og utløpslengder. Det kan også forekomme steinsprang med uvanlig lang rekkevidde når blokker får større sprang og foreserer ura. Det er også viktig å være oppmerksom på andre naturlige prosesser i området (e.g snøskred og moreneavsetning), da disse kan føre til mulige feilkilder i kartleggingen. Blokker som har gått unormalt langt forbi urfot kan for eksempel forklares med at tidligere snøskred i området har dratt med seg blokker i snømassene, eller det kan være moreneblokker fra forrige istid.

Steinsprangprosesser starter ved at en blokk glir ut fra et utløsningsområde i en bratt skrent hvor helningen som regel er større enn 45° (Dorren, 2003). Deretter beveger blokken seg nedover fjellsiden (sprangbane) og stopper i avsetningsområdet. Utglidning forekommer enten som enkeltblokk eller en liten samling av flere blokker, men de beveger seg hovedsakelig som enkeltblokker og påvirker ikke hverandre (Dorren, 2003; Hungr et al., 2014; Turner & Schuster, 2012). Velkjente former for utglidning (modes of failure) er planar sliding, wedge sliding, toppling og circular sliding (Turner & Schuster, 2012) (Figur 3).



Figur 3: Velkjente former for utglidning av steinsprang "modes of failure". Plane, (b) wedge, (c) circular and (d) toppling - sliding (Babiker et al., 2014).

Steinsprang er et resultat av både indre og ytre faktorer på berggrunnen i det aktuelle området, hvor berggrunn er den faste grunnen under de løse avleiringene på overflaten (Bryhni, 2020). Indre faktorer er relatert til berggrunnens geologiske egenskaper. Berggrunnen kan bestå av flere sprekkesett og svakhetssoner, og både beliggenhet og karakter av sprekker påvirker stabiliteten til berget (Bjørndal, 2011; Domaas & Grimstad, 2014). I følge Domaas og Grimstad (2014) er de fleste bergarter i Norge så harde at nesten all deformasjon og utglidning foregår langs svakhetsplan eller sprekkeplan i berggrunnen. Ingeniørgeologiske undersøkelser av løst berg kan gi en oversikt over løse parti og si noe om potensialet for utglidning i et gitt område, samt avdekke om videre undersøkelser er nødvendig (Bjørndal, 2011). Ytre faktorer, også kalt utløsende faktorer, er relatert til forhold som påvirker kreftene som virker på berggrunnen (Turner & Schuster, 2012). Temperatursvinginger rundt 0°C og

nedbørsmengder er to kjente utløsende ytre faktorer for steinsprang (Dorren, 2003; Jørstad, 1979; Domaas & Grimstad, 2014). Steinsprang kan forekomme hele året i Norge, men er noe mer konsentrert om våren og høsten (Jørstad, 1979) fordi dette er perioder hvor temperaturen svinger rundt 0 °C og fryse- og tinesykluser oppstår, i tillegg er det økt nedbør og snøsmelting i disse periodene. Store nedbørsmengder fører til økt vanntrykk på sprekkflater og økt poretrykk i porøse svake bergarter som øker sannsynligheten for skred (Domaas & Grimstad, 2014). Andre utløsende faktorer er rotsprengning, kjemisk forvitring, erosjon og menneskelig aktivitet (Domaas & Grimstad, 2014; Dorren, 2003).

2.2.1 Newtons lover og bevegelsesenergi

Newtons lover, også kallet Newtons kraftlover eller Newtons bevegelseslover, består av tre lover som er grunnleggende innen mekanikken fremsatt av fysikeren Isaac Newton (Grøn, 2021b). Lovene beskriver sammenhenger mellom kraft og akselerasjon og er essensielle for videre forståelse av hvordan steinsprang beveger seg.

Newtons første lov sier at dersom det ikke virker noen krefter (F) på et objekt, eller hvis summen av kreftene på det er lik null, så vil objektet enten forbli i ro eller fortsette å bevege seg med konstant fart i en rettlinjert bevegelse (Grøn, 2021b)

Newtons første lov kalles også treghetsloven fordi den beskriver hvordan objektet oppfører seg på grunn av sin treghet når det ikke virker krefter på det (Grøn, 2021b). Treghetsmomentet uttrykker en gjenstands motstand mot å få rotasjonshastigheten endret og bestemmer hvor stor bevegelsesenergi gjenstanden har i rotasjon (Grøn, 2019). Et punktformet objekts treghetsmoment (I) om en akse er definert som massen (m) ganger kvadratet av avstanden (r) fra akselen til objektet (Grøn, 2019) (Formel 1).

Formel 1: Et punktformet objekts treghetsmoment (I) om en akse med masse (m) og avstand (r) fra akselen til objektet.

$$I = mr^2 [kg \cdot m^2]$$

Newtons andre lov (Formel 2) sier at når et objekt blir påvirket av én eller flere krefter (F), vil det få en akselerasjon (a) i den retningen kreftene virker (Grøn, 2021b) Dersom objektet er i fritt fall er akselerasjon (a) lik tyngdeakselerasjonen (g) på jorden, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$.

Formel 2: Newtons andre lov. Summen av kreftene (F) som virker på objektet med masse (m) og akselerasjon (a).

$$F = ma [N]$$

Impuls (I) og bevegelsesmengde er begreper knyttet til newtons andre lov, de har samme dimensjon men beregnes ulikt (Hofstad, 2022): Impuls er kraften (F) multiplisert med den tiden (s) støtet varer og bevegelsesmengden (p) er produktet av masse (m) og hastighet (v). En impuls som påføres et objekt fører til endring av objektets bevegelsesmengde. Det vil si at impuls er endring av bevegelsesmengde (Formel 3), og dersom massen er konstant innebærer endringen i bevegelsesmengden kun en endring av objektets hastighet (v).

Formel 3: Impuls (i) er endring i bevegelsesmengde (p) hvor m er massen til objektet og v er hastigheten til objektet.

$$i = \Delta p = \Delta(mv)$$

Newtons tredje lov sier at når et objekt virker på et annet objekt med en kraft, vil det andre objektet virke tilbake på det første med en like stor kraft i motsatt retning (Grøn, 2021b). De to kreftene kalles kraft og motkraft.

Energi er det som får noe til å skje, den forekommer i forskjellige former og kan gå over fra en form til en annen (Bøe, 2022), som for eksempel potensiell energi til kinetisk energi. Energi kan også overføres fra en gjenstand til en annen. Energibevaringsloven sier at energi ikke kan oppstå eller forsvinne, men er alltid bevart, og denne loven gjør det mulig å forstå naturlige og teknologiske prosesser og forutsi utfallet av de (Bøe, 2022).

Kinetisk energi (E_k), også kalt bevegelsesenergi, er den energien en gjenstand har i bevegelse og avhenger av hastigheten (v) til objektet (Grøn, 2021a) (Formel 4).

Formel 4. Kinetisk energi (E_k), også kallet bevegelsesenergi, til et objekte med masse (m) og hastighet (v).

$$E_k = \frac{1}{2} mv^2 [J]$$

Tregghetsmomentet bestemmer hvor stor kinetisk energi og spinn objektet har i rotasjonen (Grøn, 2019). Når et objekt roterer med tregghetsmoment I og vinkelhastighet ω , er den kinetiske energien lik Formel 5 (Grøn, 2021a). Dette betyr at jo forttere et objekt roterer, desto større kinetisk energi, i form av rotasjonsenergi, har objektet (Grøn, 2021a).

Formel 5: Kinetisk energi (E_k) til et objekt i rotasjon med tregghetsmoment (I) og vinkelhastighet (ω).

$$E_k = \frac{1}{2} I\omega^2 [J]$$

Ved sammenstøt eller kollisjon av to objekter oppstår kraft og motkrefter i følge Newtons tredje lov. Et idealisert støt hvor summen av objektene bevegelsesenergi er bevart, kalles et elastisk støt (Ormestad, 2019). Alle virkelige støt er uelastiske, som vil si at deler av objektets bevegelsesenergi går over til varig deformasjon, lyd og/eller varmeenergi. Hvis objektene etter støtet blir hengende sammen og dermed får samme fart, har de fullført et fullkomment uelastisk støt (Ormestad, 2019).

2.2.2 Blokkens bevegelsesformer

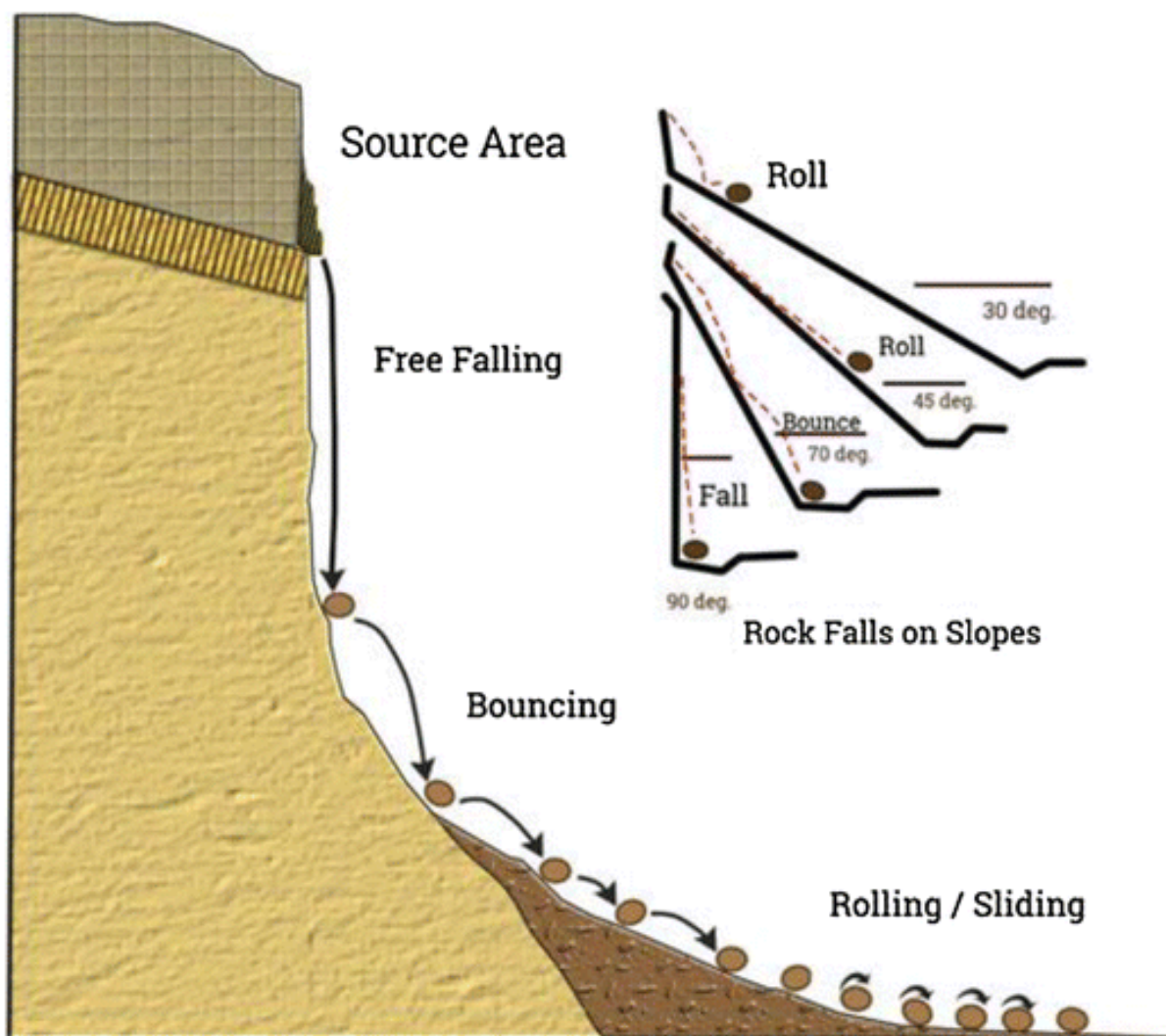
For å kunne stoppe skredblokker i bevegelse er det viktig å forstå blokkens oppførsel og bevegelsesformer. Steinsprang drives av gravitasjonskrefter og har fire viktige former for bevegelse styrt av Newtons bevegelseslover (Petje et al., 2006; Turner & Schuster, 2012):

- *Fritt fall:* Oppstår i bratt terreng når blokken ikke er i kontakt med underlaget, men kan også forekomme både når blokken spretter eller ruller. To former for bevegelse kan forekomme: translasjon og rotasjon (Turner & Schuster, 2012).

Translasjon er bevegelse hvor blokken beveger seg fra ett punkt til et annet. Rotasjon er den sirkulære bevegelsen av blokken rundt sin egen akse.

- *Sprett (også omtalt som sprang)*: Skjer når blokken kolliderer med underlaget eller andre objekt. Ved nedslag endrer fart, rotasjon og bevegelsesretning seg, i tillegg oppstår det energioverføring mellom blokken og underlaget. Energitalpet til blokken avhenger av blokkens størrelse og form, og bakkens plastiske deformasjon (Petje et al., 2006). Prosessen som skjer under nedslag er kompleks og betraktet som den minst forståtte og vanskeligste å prediktere i modellverktøy (Labouse & Heidenreich, 2009; Volkwein et al., 2011).
- *Rulling*: Når den gjennomsnittlige helningen til underlaget blir redusert går blokken fra å sprette til å rulle (Ritchie, 1963). Nedslag forårsaker ofte rotasjon og i enkelte tilfeller kan rotasjonen bli så stor at blokken ruller som et hjul og får en lengre utløpslengde enn den ellers ville ha fått (Domaas & Grimstad, 2014).
- *Glidning*: Foregår kun i startfasen og sluttfasen i steinsprangprosessen. Blokken er da i kontinuerlig kontakt med bakken (Petje et al., 2006).

Feltekspériment gjennomført av Ritchie (1963) viser at blokkens bevegelse avhenger sterkt av den gjennomsnittlige terrenghelningen. En modifisert oversikt over dette er visualisert i Figur 4 (Fanos & Pradhan, 2018).



Figur 4: Ulike former for blokkens bevegelse relatert til den gjennomsnittlige helningen på underlaget (Fanos & Pradhan, 2018) Modifisert fra Ritchie (1963).

Blokkens egenskaper samt underlag og topografi påvirker også hvordan blokken beveger seg:

- *Blokkens egenskaper:* Størrelse og tetthet på blokken påvirker hvor høy fart som er mulig å oppnå. I tillegg påvirker blokkens form og kinematiske forhold (translasjon, rotasjon og nedslagsvinkel) hvordan blokken spretter og hvor langt den går (Turner & Schuster, 2012; Labiouse & Heidenreich, 2009).
- *Underlag:* Bakketype påvirker hvor mye av blokkens energi som tas opp i underlaget. Mykere underlag tar opp mer energi og fører som regel til at sprangene dempes (f.eks. dyrket mark, sand- og grusbakker). Hardere underlag har mindre dempende effekt på blokken (Domaas & Grimstad, 2014). Underlagets ruhet påvirker hvor mye blokken spretter og ruller. Grovt underlag, fører til høyere sprang, men kan bidra til å senke farten til blokken (Turner & Schuster, 2012)
- *Topografi:* Nedover urer eller bratte bakker kan blokker bevege seg på skrå fordi ujevnheter kan slå blokker ut til siden. I tillegg kan plutselige endringer eller

ujevnheter i terrenget føre til at blokken skyter fart og får høy rotasjon ut av helningen. Uvanlige lange sprang kan da forekomme (Domaas & Grimstad, 2014).

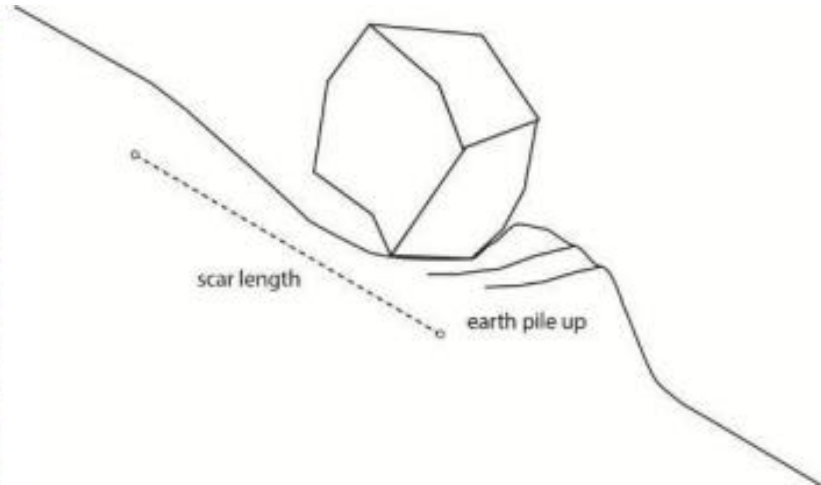
2.2.3 Friksjonskrefter

Den generelle formen for friksjon er vist i Formel 6. Friksjonskrefter oppstår i blokk-bakke-interaksjonen og er sterkt knyttet bevegelsesformene til blokken, og videre er det listet opp ulike typer for friksjon som oppstår:

Formel 6: Generell formel for friksjon hvor R er friksjonskraften, μ er friksjonskoeffisienten og N er normalkraften

$$R = \mu N$$

- Statisk friksjon (Ormestad, 2023): Motstand mot glidning mellom to flater som rører hverandre, men som fortsatt er i ro. Dersom den drivende kraften til et objekt overgår den statiske friksjonskraften settes objektet i bevegelse.
- Kinetisk eller dynamisk friksjon (ϕD): Kraften som motsetter seg forskyvning av et objekt som allerede er i bevegelse. Objektet kan da ha en rullende friksjonsmotstand eller en glidende friksjonsmotstand på underlaget hvor ulike friksjonskoeffisienter brukes. Dynamisk friksjon av en steinblokk for eksempel avhenger av friksjonsvinkelen (ϕ) til underlaget/bakketype hvor dynamisk friksjonskoeffisient (μ) er lik $\tan(\phi)$ (Rocscience, 2023f).
- Glidende friksjon (Ormestad, 2023): Glidende friksjon er friksjonskraften mellom to flater som glir i forhold til hverandre, som for eksempel et skebrett mot snø. Friksjonskoeffisienten for glidende friksjon er karakteristisk for de to flatene som glir mot hverandre, men den blir alltid mindre når farten øker. Den glidende friksjonen er mindre enn den statiske mellom de samme to flatene, ofte er den bare halvparten så stor.
- Rullende friksjon (ϕR) (Ormestad, 2023): Er også kalt rullemotstand og er ikke friksjon i fysisk betydning. En gummikloss på et skråplan for eksempel vil oppleve en egen form for friksjon hvor fenomenet beskrives som "stick-and-slip". Dette kommer av at en viss mengde små områder i berøringsflaten til klossen i tilfeldig rekkefølge ligger stille (statisk friksjon), glipper og ligger stille igjen osv.
- *Avanserte friksjonsparametere, "Viskoplastisk drag" og "Scarring"*: brukes i modeller for å beskrive fenomenet av økende friksjon ved økende glidelengde som oppstår når blokken glir på mykt underlag og jord akkumuleres foran blokken (Figur 5). "Scarring" skaper en deformasjon av bakken hvor friksjonen øker med lengden på arret, noe som kan føre til at blokken bremses ned, stopper eller vender steinen tilbake i luften (Rocscience, 2023a). Viskoplastisk drag er spredning av energi til underlaget som oppstår når blokken glir på underlaget.



Figur 5: Blokkens innvirkning på mykt underlag ved sammenstøt hvor terrengdeformasjon ("scar") oppstår. Modellert i Ramms Rockfall ved bruk av en glideavhengig friksjonsparameter som er aktiv under blokk-bakke-interaksjonen og øker med varigheten av kontakten på grunn av akkumulering av materiale foran blokken under glidning. Bilde hentet fra brukermanualen til modellen (RAMMS, 2022).

2.3 Fysiske sikringstiltak

Turner og Schuster (2012) kategoriserer ingeniørrelaterte tiltak mot steinsprang inn i tre: stabiliserende tiltak, beskyttende tiltak, og å unngå faren totalt. Man kan for eksempel stabilisere berg ved bruk av bolter, beskytte mot steinsprang ved å etablere tiltak som stopper steinspranget i sprangbanen eller unngå faren ved å ikke bygge i faresonen. Dette delkapittelet tar i hovedsak for seg beskyttende tiltak, og mer spesifikt steinspranggjerd, også kalt fanggjerd, som plasseres i sprangbanen for å stoppe utløste steinsprang. Andre eksempler på beskyttende sikringstiltak er betongmurer og fangvoller.

Felles for beskyttende tiltak er at de fanger opp eller hindrer steinsprang i å nå sikringsobjektet, som typisk kan være bebyggelse, vei, jernbane eller annen infrastruktur. Valg av sikringstiltak avhenger av de lokale forholdene, og de kan kombineres seg imellom eller med andre risikoreducerende tiltak.

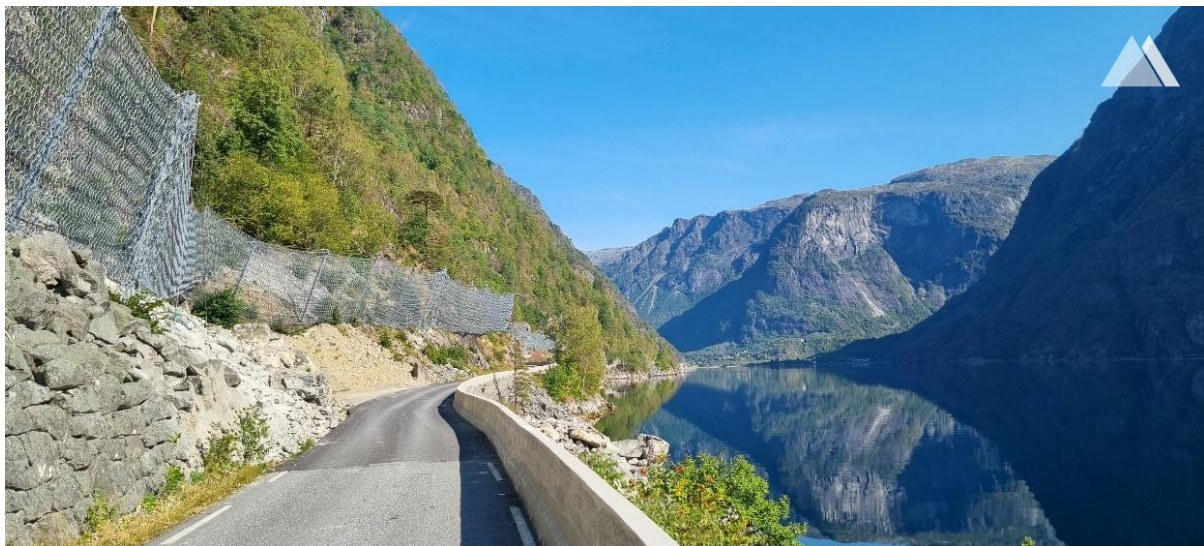
2.3.1 Betongmurer og fangvoller

Betongmurer er et stivt sikringselement og brukes der plassen er liten og hvor voller ofte ikke er et alternativ. Betongmurer må fundamenteres godt, være brede nederst og sikret for velting (Jørstad, 1979). De lages ofte med en horisontal sokkel og med forankring ned i bakken (Domaas & Grimstad, 2014). Betongmurer skal motstå energien et steinsprang representerer og dimensjoneringen utføres med beregning av kraftstøtet ved den bevegelsesmengden steinspranget har sammen med et estimat av den tiden innslaget tar (Bjørndal, 2011). Innslaget tar svært kort tid og kan føre til sprekker på muren fordi kraften mobiliseres over et lite område. Polstring kan brukes for å unngå dette. (Domaas & Grimstad, 2014).

Der det er mer plass og slakere terreng er fangvoller brukt, ofte kombinert med grøft mot fjellsiden. Fangvoller er rimeligere og krever mindre vedlikehold enn fanggjerder. Fangvoller dimensjoneres etter steinsprangets fart og rotasjon og må utformes slik at blokker med rotasjon ikke kan rulle over vollen (Bjørndal, 2011). Rene løsmassevoller bør eksempelvis ikke være brattere enn 34° for å ha tilstrekkelig kapasitet. Ut fra en energibetraktning kan det regnes ut hvor høyt blokken kan klatre oppover vollsiden (Domaas & Grimstad, 2014).

2.3.2 Steinspranggjerde

Året 1958 ble verdens første sikringsstruktur mot steinsprang bestående av ståltaunett konstruert i Sør-Sveits av GeobruGG AG (GeobruGG, 2023). Dette markerer starten på utviklingen av steinspranggjerder. De har etter dette blitt brukt i Norge siden midten av 70-tallet, og nå er flere konstruksjoner i bruk (Domaas & Grimstad, 2014). Steinspranggjerder er fleksible, hvor gjerdene fjærer slik at kreftene ved anslag av en blokk fordeles ut i en stor del av konstruksjonen. Kreftene tas opp i bremseelement/støtdempere som er plassert på forankring og oppheng til selve fangnettet (Domaas & Grimstad, 2014). Dette gjør at de kan ta opp store energimengder ved treff. Dagens steinspranggjerder har en kapasitet på opptil 10 000 kilo-Joule [kJ]. Eksempel på kjente produsenter av steinspranggjerder er Trumer Schutzbauten (Østerrike), Pfeifer Isofer AG (Sveits), GeobruGG AG (Sveits) og Maccaferri (USA). Figur 6 viser to prosjekter i Norge hvor steinspranggjerde levert av GeobruGG er brukt til sikring av vei mot steinsprang.



Figur 6: Eksempel på steinspranggjerde. Vei i Ulvik sikret mot steinsprang ved bruk av gjerde produsert av GeobruGG. Bilde: GeobruGG.com.



Figur 7: Eksempel på steinspranggjerd. Steinspranggjerd over inngangsparti til tunell i Lensvik i Trøndelag. Gjerdet har en kapasitet på 8000 kJ og er 7 meter høyt. Bilde: Geobrugg.com.

Fordelen med steinspranggjerder er at de egner seg bedre i bratt og utfordrende terreng, som vist i Figur 7. Normalt plasseres steinspranggjerder i nedre del av skredløpet som et beskyttende tiltak, med en "buffersone" mellom steinspranggjerdet og sikringsobjektet for å gi rom for deformasjon av gjerdet ved anslag (Bjørndal, 2011). På grunn av ujevnt terreng er det vanlig med oppdeling i flere gjerdeseksjoner som horisontalt overlapper hverandre (SVV, 2020). Gjerder plasseres som regel med en vinkel normalt (90-100°) på underlaget (NVE, 2023, ikke publisert).

2.3.3 Dimensjonering av steinspranggjerd

Modellverktøy beregner parametere som energi og spranghøyde langs fjellsiden som brukes for dimensjonering av steinspranggjerd. Disse parametere vil heretter bli referert til som designparametere. Når designparametere gjennom modellering er valgt starter en ny prosess

i dimensjoneringen, hvor endelig energikapasitet og høyde på steinspranggjerdet fastsettes, og denne prosessen er videre forklart under.

Valg av energimengde

Grunnet økt bruk av steinspranggjerdet i hele Europa publiserte European Organization for Technical Assessment (EOTA), i 2008 "ETAG 27 guidelines, Guideline for European Technical Approval of Falling Rock Protection Kits", som er en veileder for testing og verifisering av steinspranggjerdet mot skred. I 2019 ble denne erstattet med dokumentet "EAD 340059-00.0106, Falling rock protection kits" (EOTA, 2018). Dokumentet tar for seg testoppsett, metodikk, sertifiseringskrav og obligatorisk dokumentasjon for steinspranggjerdet. Standarden operer med to ulike energiklasser, MEL og SEL, for steinspranggjerdet som må tas hensyn til ved dimensjoneringen (Tabell 4). SEL står for "Service Energy Level", og er den energimengden steinspranggjerdet kan ta opp for å kunne tåle ett skred til av samme størrelse uten å trenge vedlikehold i mellomtiden. MEL står for "Maximum Energy Level", og er den energimengden det krever for å dra bremseelementet helt ut. Standarden anbefaler å designe steinspranggjerdet slik at energimengden for dimensjonerende skred settes til SEL (SVV, 2020), siden steinspranggjerdet da vil tåle to treff før det er behov for vedlikehold.

Tabell 4: Energitklasser med MEL og SEL gitt av EAD 340059-00-0106/ETAG 027.

Energitklasser	0	1	2	3	4	5	6	7	8
SEL [kJ]	-	85	170	330	500	660	1000	1500	>1500
MEL [kJ]	100	250	500	1000	1500	2000	3000	4500	>4500

Bruk av sikkerhetsfaktor

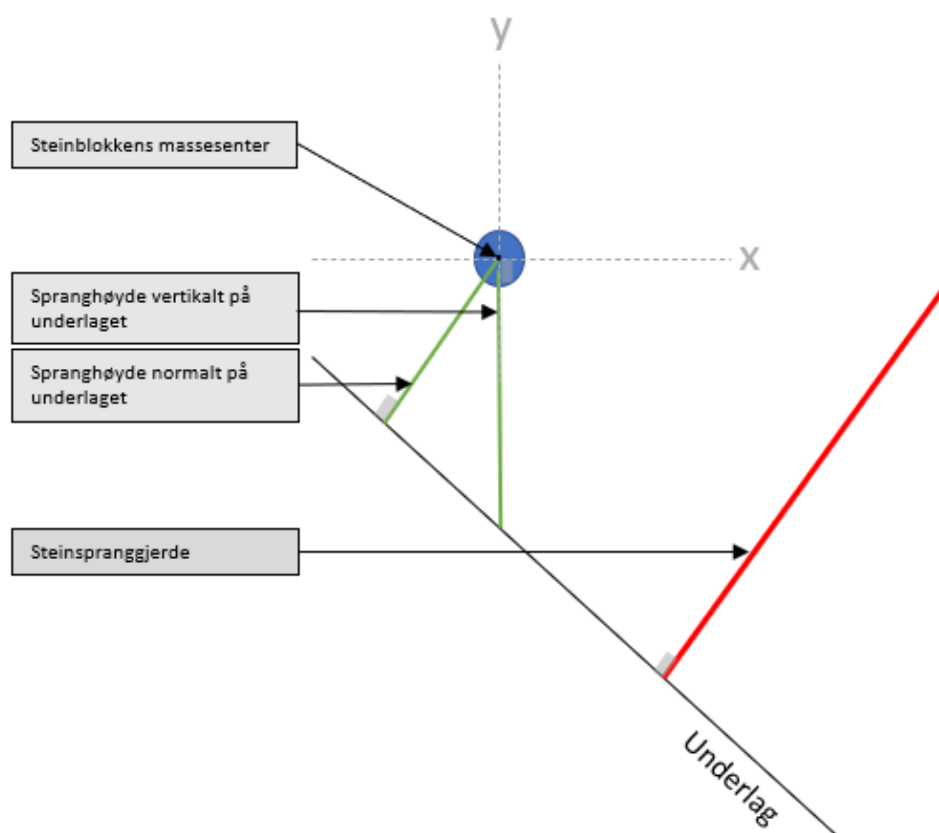
Det brukes ofte en sikkerhetsfaktor (γ), også kalt partialfaktor, ved dimensjonering av sikringstiltak. Statens vegvesen anbefaler å bruke partialfaktormetoden fra den europeiske standarden "NS-EN 1997 Eurokode 7: Geoteknisk prosjektering" (SVV, 2020) for de kritiske designparameterne for et steinspranggjerdet. Standarden bruker en sikkerhetsfaktor $\gamma = 1.3$ for kinetisk energi og høyde (SVV, 2020). Eksempel på bruk av denne er gitt under:

Eksempel (SVV, 2020): Modellering i *RAMMS Rockfall* (RR) viser at energien til et representativt steinsprangscenario fordeler seg mellom 800-1100 kJ, men med noen ekstremverdier opp mot 1400 kJ. Fordi du ønsker å unngå mye vedlikehold setter du dimensjonerende energimengde til $1100 \times$ sikkerhetsfaktor ($\gamma = 1.3$) = 1430 kJ. Basert på dette velges steinspranggjerdet styrke til SEL \approx 1500 kJ og steinspranggjerdets energiklasse settes derfor til klasse 7 med MEL = 4500 kJ. Leverandører vil da typisk tilby et steinspranggjerdet med en kapasitet på 5000 kJ. Det dimensjonerte steinspranggjerdet skal da tåle to treff på 1500 kJ før vedlikehold er nødvendig.

Østerrikes standard opererer med både sikkerhetsfaktor og geometrisk faktor som kan brukes ved fastsetting av respektivt energinivå og høyde (ØSI, 2021). For begge, varierer disse mellom 1, 1.05 eller 1.15 avhengig av definerte sikkerhetsklasser som er oppgitt i standarden.

Valg av høyde

Faktorer som blokkvolum, bratthet og terrengets hardhet påvirker endelig valg av dimensjonerende høyde på steinspranggjerdet (SVV, 2020). Sikringshåndboka (NVE, 2023, ikke publisert) anbefaler at dimensjonerende høyde for steinspranggjerdet bør minimum være til topp av referanseblokk, det vil si at blokkens radius fra lengste hovedakse blir lagt til spranghøyden som hentes ut fra simuleringsresultatet. Man må derimot være oppmerksom på at modellverktøy definerer spranghøyder ulikt (Figur 8). RR representerer eksempelvis høyde vertikalt i forhold til bakken, mens RF3D representerer høyde normalt på bakken. I dette tilfellet representerer begge modellene høyden fra blokkens massesenter og ikke fra toppen av blokken. Et annet moment ved valg av dimensjonerende høyde på steinspranggjerdet er vinkel på steinspranggjerdet i forhold til helningen. Steinspranggjerder monteres vanligvis med en vinkel på 90-100 grader på terrengoverflaten. Dette, kombinert med hva avlest høyde fra modellverktøy representerer er viktig å ha kontroll over for å kunne fastsette høyde på riktig grunnlag.



Figur 8: Blokkens (blå sirkel) spranghøyde målt fra blokkens massesenter til enten normalt eller vertikalt på underlaget.

Dokumentet "Falling rock protection kits" stiller krav til at godkjent fanggjerde ikke skal være lavere enn det godkjente testgjerdet, og ikke være mer enn 1 m høyere enn det godkjente testgjerdet (EOTA, 2018; Bjørdal, 2011). I tillegg stilles det krav til steinsprangets minimum resthøyde etter treff: Med resthøyde menes det den effektive høyden av gjerdet etter treff. Dersom gjerdet er truffet og fanger flere større blokker med stor energi vil gjerdet få en lavere resthøyde, og resterende blokkmasse fra steinspranget kan gå over og treffe veien (Bjørdal, 2011). Gjerdets resthøyde klassifiseres som vist i Tabell 5, hvor energinivået MEL er dimensjonerende (EOTA, 2018). Den oppgitte resthøyden til steinspranggjerdet bør derfor taes stilling til ved valg av og fastsetting av dimensjonerende høyde på steinspranggjerdet.

Tabell 5: Klassifisering for resthøyde av steinspranggjerder etter treff hvor MEL er dimensjonerende (EOTA, 2018).

Kategori A	Resthøyde \geq 50% opprinnelig høyde
Kategori B	Resthøyde 30-50 % av opprinnelig høyde
Kategori C	Resthøyde \leq 30% av opprinnelig høyde

2.4 Generelt om modellverktøy

Det er flere modellverktøy på markedet som brukes for simulering av steinsprang (Dorren, 2003; Volkwein et al., 2011; Hefre & Mo, 2020). Dette delkapittelet tar for seg bruken av dynamiske modellverktøy og generelle beregningsprinsipper i slike modeller. Empiriske modeller er ikke diskutert.

Dynamiske modellverktøy beskriver steinsprangprosessen ved bruk av matematiske tilnærminger av de dynamiske prosessene som oppstår. Dynamisk betyr preget av forandring, utvikling eller bevegelse, og innen fysikk brukes dynamisk om det som omhandler bevegelse og det som gjelder læren om mekanikk (Gundersen, 2020).

2.4.1 Bruk av modellverktøy for dimensjonering av steinspranggjerder

Modellverktøy beregner parametere som energi og spranghøyde langs fjellsiden som danner grunnlaget for videre dimensjonering og valg av energikapasitet og høyde på sikringstiltaket. Nåværende er det ingen retningslinjer i Norge om hvilke modellverktøy som er egnet for dimensjonering av steinspranggjerder. Kjente modeller som brukes i Norge dag er CRSP, RocFall2 (RF), RAMMS Rockfall (RR) og Rockyfor3D (RF3D) (Bjørdal, 2011; Hefre & Mo, 2020; SVV, 2020). Sikringshåndboka formidler at ansvaret er lagt på utførende/skredkyndige når det gjelder valg av modellverktøy (NVE, 2023, ikke publisert). Det finnes derimot anbefalinger for bruk av RF ved dimensjonering av sikringstiltak fordi modellen tilbyr flere barriere-analysemuligheter i sprangbanen slik at man kan undersøke området i mer detalj (Hefre & Mo, 2020).

I arbeid med dimensjonering av sikringstiltak må et sikringsmål fastsettes, og dette vil si at man må ta stilling til hva man ønsker å sikre mot og hvor høy sikkerhet man ønsker å oppnå. Som nevnt i kapittel 2.1.2 utarbeides det faresonekart for skred i bratt terreng, hvor kartene angir faresoner etter sikkerhetsklassene i TEK17 (Tabell 1 og Tabell 2). Faresonene brukes ofte som dimensjonerende sikringsmål og det er derfor viktig å sette seg godt inn i eksisterende grunnlagsmateriale. Dersom faresonekartleggingen ikke er utført i henhold til NVEs veileder for utredning av sikkerhet mot skred i bratt terreng (NVE, 2020) bør faresonene kvalitetssikres før arbeid med sikringstiltak starter. Faresonene danner det første grunnlaget for en nytte/kost-analyse for sikringstiltak (NVE, 2023, ikke publisert).

Når sikringsmål er bestemt kalibreres modellen ved, for eksempel, å simulere et scenario tilsvarende det sikringsmålet som er satt. Kalibrering av modell gjennomføres ved å gjøre små justeringer på inngangsverdier (e.g bakkeruhet, løsneområde, blokkform) slik at simuleringresultatet samsvarer med tiltenkt skredscenario. Parameterkalibrering er viktig for de fleste dynamiske modeller om du skal få realistiske simuleringresultater (Volkwein et al., 2011). Intensjonen med kalibreringen er å få realistiske simuleringresultat slik at man kan fastsette korrekt designparametere (spranghøyde og energi) for videre dimensjonering av sikringstiltak.

I Østerrikes standard ONR24810 (ØSI, 2021) er fremgangsmåte for valg av blokkdesign (form og volum) presisert. Valg av blokkdesign påvirker generelt simuleringresultater i stor grad (Asplin, 2021; Glover, 2015; Hefre & Mo, 2020; Morken, 2021; Illeditsch & Preh, 2020). Volumet på blokken vil eksempelvis påvirke hvor mye energi som oppnås (Formel 4). Valg av for stor blokk i simuleringer kan derfor føre til overdimensjonerte steinspranngjerder, mens en for liten blokk kan føre til at ønsket sikringsmål ikke er oppnådd. Valg av blokkdesign bør derfor reflektere virkeligheten og tiltenkt skredscenario mest mulig for å oppnå realistiske resultater og ønsket sikringsmål.

I modellene kan simuleringresultatet bli representert i ulike statistiske former (e.g. gjennomsnitt, Q95-persentil, Q98-persentil, max-verdier). Ved tolkning av resultatfiler må man bestemme hvilken persentil man ønsker å se på for fastsetting av designparametere for videre dimensjonering av sikringstiltak. Maksverdier bør man være forsiktig med å bruke da disse kan representere uteliggere i resultatet. Valg av persentil er avgjørende for videre dimensjonering av sikringstiltak, men det er ingen standard prosedyre på hvilken som bør velges. Dette varierer og avhenger av hvilket sikkerhetsnivå man ønsker å oppnå. Østerrikes standard anbefaler Q99 for energi og Q95 for spranghøyder (målt normalt på helning) i tillegg til en respektivt sikkerhetsfaktor og geometrisk faktor (ØSI, 2021). For RF3D anbefaler EcorisQ å benytte Q95-persentil av designparametere (Dorren, 2016).

Plassering av sikringstiltak og valg av designparametere bestemmes på detaljnivå, og det kreves derfor en digital terrengmodell (DEM) med høy oppløsning. DEM brukes som inngangsparameter i modellverktøy, og beskriver høydeoverflaten i den aktuelle fjellsiden ved bruk av rutenett (pixler med gitt cellestørrelse) med definerte høydeverdier, og er et såkalt rasterformat. Høy DEM oppløsning, som vil si mindre cellestørrelse (e.g 0,5x0,5 og 1x1

meter) gir mer detaljert visning av terrenget, men krever lengre simuleringstid. I tillegg kan høy oppløsning føre til mer ruhet i terrenget, noe modellverktøyene er svært sensitiv for. Ved bruk av lav DEM-oppløsning (økt cellestørrelse som fører til at terrenget jevnes mer ut, e.g 10x10 meter) har simuleringresultatene en tendens til å overestimere hastigheter og underestimere spranghøyde og spredningen sideveis (Agliardi & Crosta, 2003; Crosta et al., 2015; Noël et al., 2021).

Når designparameterne (spranghøyde og energi fra modellering) er funnet starter en ny fase i dimensjoneringen hvor endelig kapasitet og høyde fastsettes (forklart i kap. 2.3.3).

2.4.2 Beregningsprinsipper

Modellverktøy skilles ofte i henhold til deres romlige dimensjoner og/eller deres underliggende beregningsprinsipper (Li & Lan, 2015; Volkwein et al., 2011). RF simulerer eksempelvis steinsprang i to dimensjoner (2D), mens RR og RF3D simulerer steinsprang i tre dimensjoner (3D). Beregningsprinsipper, er tett knyttet til beregning av blokkens oppførsel under nedslag hvor man skiller mellom deterministiske og probabilistiske modeller, og om blokken simuleres med en rigid body tilnærming eller lump mass tilnærming.

Probabilistiske modeller tar hensyn til det faktum at at man sjelden kan vite alt om en situasjon og at tilfeldighet spiller en rolle i å forutsi fremtidige hendelser. Slike modeller integrerer derfor tilfeldige variabler og sannsynlighetsfordelinger av parameterverdier som brukes i nedslags-beregningen. Dette er for å ta hensyn til den store variasjonen i de reelle verdiene av disse parameterne (Volkwein et al., 2011; Li & Lan, 2015). En deterministisk modell har et system som ikke baserer seg på tilfeldigheter, som vil si at kun endring i startbetingelser eller inngangsverdier vil gi endring i resultatfilene. En modell kan også være delvis deterministisk og delvis probabilistisk.

Med lump mass er blokkens mass konsentrert til ett punkt, og tar dermed ikke hensyn til formen på blokken eller rotasjonsbevegelsen (Volkwein et al., 2011). Rigid body tilnærming representeres blokken som en ekte geometrisk form, som for eksempel sfære, kube, sylinder eller ellips) (Volkwein et al., 2011).

2.4.3 Restitusjonskoeffisient

Restitusjonskoeffisienten er et estimat på hvor mye energi eller hastighet som blir redusert i blokken under nedslag, og påvirker simuleringresultat i stor grad (Chau et al., 2002; Volkwein et al., 2011).

En populær definisjon av restitusjonskoeffisienten (R) er forholdet mellom blokkens utgående hastighet (V_u) etter nedslag og inkommende hastighet (V_i) før nedslag, som beregnes ut ifra massesenteret til blokken (Turner & Schuster, 2012) (Formel 7).

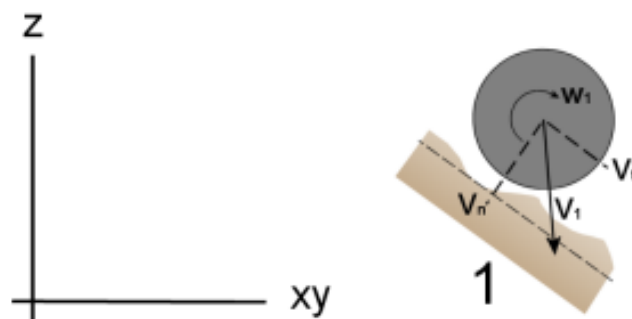
Formel 7: Restitusjonskoeffisient (R). V_u er utgående hastighet og V_i er inkommende hastighet.

$$R = \frac{V_u \text{ [m/s]}}{V_i \text{ [m/s]}} [-]$$

R har alltid en verdi mellom 0 og 1 ($0 > R < 1$). I en perfekt elastisk sammenstøt ($R = 1$) er hastighet til blokken under nedslag bevart. I en perfekt uelastisk sammenstøt ($R = 0$) stopper blokken momentant på underlaget uten å sprette. I realiteten er begge disse scenario umulig å oppnå (Asteriou et al., 2012).

De fleste modellverktøy for simulering av steinsprang anvender restitusjonskoeffisienter når inngangsverdier for bakketype velges (f.eks. fast fjell, jord og ur). Et hardere underlag har eksempelvis mindre dempende effekt på blokken og har derfor en høyere restitusjonskoeffisient enn et mykt underlag. Restitusjonskoeffisienten påvirkes sterkt av nedslagsvinkelen og andre nedslagsforhold langs sprangbanen, og ulike verdier for R er funnet både gjennom felteksperimenter og teoretiske estimat (Chau et al., 2002; Cross, 1999; Labiouse & Heidenreich, 2009; Nagendran & Ismail, 2019; Bar et al., 2016). Grunnet ulike krefter som virker på blokken er parameteren definert på ulike måter i litteraturen, og derav definert ulikt i modellverktøy. Noen verktøy definerer den basert på kinetisk energi, mens andre benytter hastighet (Asteriou et al., 2012; Turner & Schuster, 2012). R uttrykkes ofte enten som normal restitusjonskoeffisient (R_n) eller tangentiell restitusjonskoeffisient (R_t) grunnet ulike krefter som virker normalt og parallelt på underlaget (Figur 9). Programmene har som regel standardverdier for koeffisienten for ulike bakketyper, basert på enten normal eller tangentiell restitusjonskoeffisient, men disse kan også i enkelte modeller justeres.

Halvskala felteksperiment (sammenstøt < 100 kJ) utført av Labiouse og Heidenreich (2009) viser derimot at både blokkens utforming og kinematiske forhold påvirker restitusjonskoeffisienten. Labiouse og Heidenreich (2009) konkluderer med at restitusjonskoeffisientene ikke er nok til å beskrive den komplekse prosessen som skjer under nedslag, og at modelleringsresultater derfor bør tolkes med forsiktighet.



Figur 9: Konvertering av hastighet (V_1) i horisontalplanet (xy) og vertikalplanet (z) til normal hastighet (V_n) og tangentiell hastighet (V_t). W_1 er rotasjonshastighet. Modifisert figur fra Dorren (2016).

2.5 Utvalgte modellverktøy

Dette kapitlet beskriver de utvalgte modellverktøyene; Ramms Rockfall, Rockyfor3D og RocFall2. For hver modell er det lagt vekt på detaljer og ulikheter rundt i) Beregning av nedslag og ii) Inngangsparametere, da dette er funksjonalitet med betydelig påvirkning på simuleringsresultat.

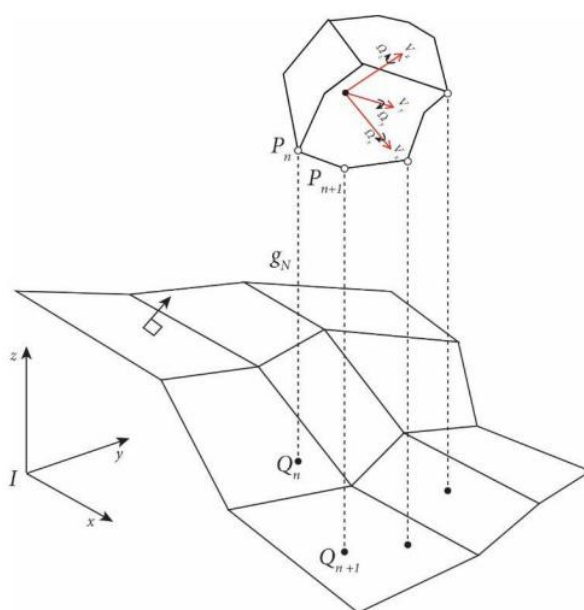
2.5.1 RAMMS Rockfall

Ramms Rockfall (RR) er utarbeidet av SLF (Institute for Snow and Avalanche Research) og WSL (Swiss Federal Research Institute) i samarbeid med ETH (Swiss Federal Institute of Technology) (RAMMS, 2022). RR simulerer steinsprang i 3D, hvor hver blokk simuleres deterministisk og variasjon i sprangbanene oppnås ved å endre på startbetingelsene.

Beregning av nedslag

Modellen skiller seg fra de to andre modellene ved å bruke en "hard-contact" og rigid body tilnærming (RAMMS, 2022). Med "hard-contact" menes det at en blokks interaksjon med bakken er parametrisert, ved bruk av friksjonsparametere, som resulterer i kontaktkrefter på blokkens kanter og midtpunkt under støt med underlaget (RAMMS, 2022). Disse kreftene betraktes som eksterne krefter, og kan derfor påvirke blokkens retning etter et sammenstøt (Se kap. 2.2.1 om Newtons lover og bevegelsesenergi).

En blokks kontakt med bakken i steinsprangforløpet er definert gjennom sammenligning mellom den vertikale avstanden mellom blokkens hjørnepunkter (P) og terrengprojeksjonen (Q), og med dette kan både blokkens bevegelse og orientering tas hensyn til i blokk-bakkeinteraksjonen (RAMMS, 2022), se Figur 10.



Figur 10: Kontaktpunkter mellom blokk (P) og terreng (Q) Bilde hentet fra Ramms Rockfall brukermanual (RAMMS, 2022).

Dersom det under et sammenstøt beregnes negativ hastighet, som teoretisk sett betyr at kontaktpunktet (P) vil bevege seg gjennom bakken, er det definert i modellen at det oppstår impulsive kontaktkrefter (RAMMS, 2022). Dette resulterer i en impulsiv endring i hastighet, slik at normal hastighet etter nedslag ikke er negativ. Kontaktpunktene før og etter påvirkning er styrt av en normal restitusjonskoeffisient (R_n), hvor R_n representerer bakkens hardhet/elasticitet og defineres av valgt bakketype.

Impulsive normalkrefter kan også indusere impulsive tangentielle krefter, men i RR er $R_t = 0$ da denne effekten er antatt fraværende. RAMMS (2022) begrunner dette med at impulsive tangentielle krefter observeres hovedsakelig på "superballs" (sprettball/gummiball på størrelse med golfball) når det oppstår elastisk deformasjon av ballen under sammenstøt og antas derfor fraværende i blokken (Cross, 1999; RAMMS, 2022).

RR introduserer også to fysiske krefter som motsetter seg bevegelsen av en fallende blokk: glidende friksjonskraft ("scarring") og "drag" (RAMMS, 2022) (se også kap. 2.2.3 Friksjonskrefter). I teorien er "hard-contact" kun representativ for to harde objekt som støter mot hverandre hvor deformasjon under støt er tilnærmet null. I virkeligheten skjer blokk-bakke-interaksjonen med en rekke forskjellige bakketyper med ulike deformasjonsegenskaper. For å ta hensyn til dette er den glideavhengige friksjonsparameteren medregnet under blokk-bakke-interaksjonen, og øker med varigheten av kontakten på grunn av akkumulering av materiale foran blokken under glidning. Den glidende friksjonen virker på punkter av blokken som er i kontakt med bakken, og vil skape dreiemomenter som initierer rotasjonsbevegelser. Drag virker derimot på blokkens massesenter, skaper ingen ekstra roterende moment, og virker i motsatt retning av blokkens bevegelsesretning. Det er definert to dragkrefter i RR, hvor den første behandler vegetasjonsdrag (ved simulering med skog) og den andre behandler viskoplastisk bakkedrag på grunn av terrengdeformasjon som forekommer når blokken glir på terrengoverflaten. Denne dragkraften er proporsjonal med blokkens totale kinetiske energi, som resulterer i at tyngre blokker og blokker med høy hastighet opplever mer dragkraft enn mindre og langsommere blokker.

Inngangsparametere

Oversikt over inngangsparametere i RR er vist i Tabell 6 (RAMMS, 2022). Når simuleringen er fullført vil en loggfil automatisk lagres og vises, og den gir en kort oppsummering av simuleringsinnstillinger og resultater. I tillegg blir sprangbaner automatisk lagret som shape-filer. Resultatene kan også eksporteres til ASCII- eller TIFF-fil

Tabell 6: Inngangsparametere i RR (RAMMS, 2022).

Inngangsparameter	Beskrivelse
Digital terrengmodellel (DEM) i ASCII eller TIFF-fil	Representerer topografien i utvalgt område og er avgjørende for hvordan blokkken beveger seg (e.g. utløpslengde, spranghøyde, hastighet og energi). Det anbefales minimum DEM-oppløsning på 2-5 meter for å oppnå realistiske resultat. Områder hvor variasjon i terrenget er høy innenfor få meter anbefales en DEM-oppløsning på 0,5-1 meter.
Bakketype	Ruhet og hardhet på terrenget inkluderes ved å definere forskjellige bakketyper manuelt i GUI. Det kan velges mellom 8 ulike bakketyper: ekstra soft, soft, medium soft, medium, medium hard, hard, ekstra hard og snow. Det velges en bakketype for hele området, men dersom det er ønskelige kan man i tillegg definere bakketype for utvalgte områder (e.g ur eller gressområder) ved å lage polygoner av ønsket område. Dette kan gjøres enten i modellens GUI eller ved bruk av GIS.
Blokkstørrelse og blokkform	Man velger mellom sfærisk blokk (definert av radius), kubeformet blokk (definert av x-y-z dimensjoner), eller "ekte blokker" som defineres i programmets "Rock builder". Dette gir flere valgmuligheter for blokkform og størrelser.
Løsneområde	Defineres enten som punkt, polylinje eller polygon. Deretter angis antall tilfeldige orienteringer ved utslipp blokken(e) skal ha. I tillegg beregnes automatisk en ekstra fallhøyde som trengs for å sette i gang steinspranget, og denne kan endres manuelt om ønskelig.
Beregningsområde	Polygon som definerer hvilket område beregningene skal kjøres for.
Skog	Kan inkluderes.

Resultatfiler og analysemuligheter

RR produserer flere resultatfiler, men de mest relevante for dimensjonering av sikringstiltak er parameterne; spranghøyder, hastighet og energi (RAMMS, 2022):

- Ekintrans: Kinetisk translasjonenergi kJ
- Ekinrot: Kinetisk vinkelenergi kJ
- Ekin: Total kinetisk energi (translasjon + rotasjon) kJ
- Vres: Absolutt hastighet (m/s)
- Wres: absolutt rotasjons hastighet (rot/s)

- JumpH: Spranghøyder (oppgett som den vertikale distansen fra blokkens massesenter til bakken i meter).

Resultatfilene visualiseres enten i "Statistic Mode" eller "Trajectory Mode". Førstnevnte brukes for å se på store antall simuleringer, men her er kun resultat relatert til spranghøyder, hastighet og energi tilgjengelig. Sistnevnte brukes for å analysere enkelte sprangbaner i detalj.

RR tilbyr ulike analysemuligheter i modellens programvare (RAMMS, 2022). Funksjonen "Summary Plot" gir statistiske verdier (e.g. gjennomsnitt, median og kvantiler) av valgt resultatfil i tillegg til statistiske fremstillinger (e.g. probability distribution function og boxplot). Funksjonen "Line Profile" viser graf av valgte resultatfiler langs en spesifikk linje. Dette er nyttig dersom man ønsker å studere verdier langs et område, som for eksempel langs en veg. Funksjonen "Barrier Plot" er et bra valg for planlegging av sikringstiltak. Ved bruk av denne funksjonen kan man hente ut statistisk informasjon, lik "Summary Plot", for en spesifikk linje eller polygonområde etter eget ønske. En ny funksjon i RR, lansert høsten 2022, er "Trajectory Impact-Analysis from shapefile". Denne kan brukes til å analysere blokktreff på polygonområder som for eksempel gallerier, veier og demninger. Grafer vil da vise treffvinkler i grader, samt to tekstfiler hvor treffdata og treffsprangbanedata blir lagret.

2.5.2 Rockyfor3D

Rockyfor3d (RF3D) er utviklet av EcorisQ (Dorren, 2016) og er en av de mest brukte dynamiske modellene for faresonekartlegging for steinsprang i Norge (Hefre & Mo, 2020). Modellen bruker en kombinasjon av deterministiske algoritmer med stokastiske metoder for 3D-simulering av enkeltblokkers bevegelse i fritt fall og i kontakt med underlaget, noe som gjør RF3D til en probabilistisk prosessbasert dynamisk modell (Dorren, 2016)

Beregning av nedslag

For beregning av blokkposisjonen, nedslag på skråningsoverflaten og støt mot trær bruker RF3D alltid en sfærisk blokkform (Dorren, 2016). Beregning av nedslag er basert på skråningsoverflateegenskaper, innkommende blokkhastighet og penetrasjonsdybde (Dorren, 2016, s. 15-17). Returhastigheten er funnet ved å dekomponere den innkommende hastigheten i det horisontale (x, y) og vertikale (z) planet til en innkommende normal og tangentiell hastighet.

Den normale restitusjonskoeffisienten (R_n) representerer i RF3D bakkens elastisitet, og er direkte koblet til valgt bakketype. R_n brukes til å finne den normale hastighetskomponenten til blokken etter nedslag. Penetrasjonsdybden i blokk-bakke-interaksjonen beregnes av en algoritme ved hjelp av R_n , blokkens diameter og masse, og innkommende hastighet av blokken under nedslag. Den maksimale penetrasjonsdybden er lik radiusen til den simulerte blokken. Blokker med større hastighet har større energi (Formel 4), som resulterer i at de vil penetrere seg mer ned i underlaget enn hva en en blokk med mindre energi hadde gjort, og

dette tar modellen hensyn til ved å redusere R_n når nedslagshastigheten øker..Den tangentielle restitusjonskoeffisienten (R_t) representerer ruheten i terrenget og defineres av modellen basert på inngangsverdier av bakkeruhet samt radius til den fallende blokken. En stor fallende blokk opplever en lavere effekt av overflateruhet enn en liten blokk. R_t brukes til å finne den tangentielle hastighetskomponenten til blokken etter nedslag. Programvaren varierer tilfeldig både R_t og R_n med +/- 10 % for å representere den naturlige variansen i overflateruhet.

Rotasjonshastigheten er funnet basert på blokkens tangentielle hastighet etter nedslag og blokkens radius. Rullende bevegelse simuleres som sekvenser av sprang med korte intervaller med en avstand på minimum 0,2 m til maksimum lik blokkens radius og skjer bare for skråninger med en helning mellom mellom 0° og 30° . Glidning av blokken er ikke simulert.

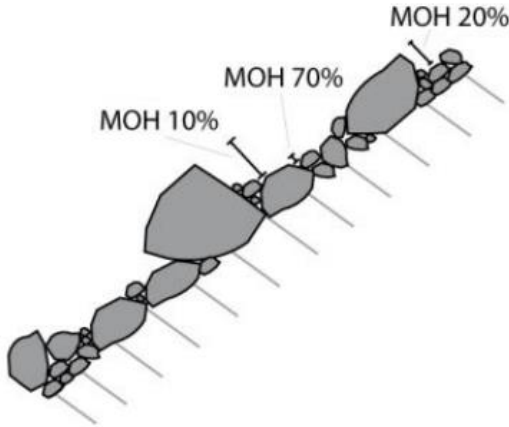
Inngangsparametere

RF3D krever 10 inngangsparametere, vist i Tabell 7, av typen raster i ESRI ASCII format (Dorren, 2016)), og disse må ha samme oppløsning (cellestørrelse) og utstrekning. I tillegg må antall simuleringer og variasjon på blokkvolum defineres, man kan også legge til en ekstra fallhøyde om ønskelig. Forberedelse av inngangsparameterne gjøres i GIS hvor polygoner blir definert og eksporter til inngangsdata.

RF3D tilbyr "Rapid automatic simulation" (RAS) (Dorren, 2016), som vil si at modellen kan definere løsneområde, terrengparametere og bakkeruhet automatisk med kun digital terrengmodell (DEM) som inngangsparameter. Bruker kan da spare tid ved å ikke måtte forberede filer for bruk som inngangsdata i modellen. Simuleringer med bruk av RAS krever en DEM med høy oppløsning da inngangsparametere er basert på en representasjon av topografien, og beregnes konservativt ut fra terrengets skråningsgradient (Dorren, 2016).

Tabell 7: Inngangsparametere i RF3D (Dorren, 2016).

Inngangsparameter	Beskrivelse
dem.asc	Digital terrengmodell (DEM). Lav oppløsning (dvs økt cellestørrelse) reduserer nøyaktigheten i resultatene og det anbefales en DEM-oppløsning på minimum 2-5 meter.
rockdensity.asc	Definerer blokkens tetthet og hvilke celler som brukes som utløsningsområde. Celler med tetthet lik 0 vil ikke bli vurdert som et utløsningsområde.
d1.asc d2.asc d3.asc	Tre raster-filer som definerer høyde, bredde og lengde på blokken. Det er også mulig å definere disse i modellens GUI. I tillegg kan blokkvariasjon (prosent) og ekstra fallhøyde (meter) defineres i modellen.
blshape.asc	En rasterfil (som forberedes i GIS) som definerer den geometriske formen på blokken.

	<p>Det er også mulig å definere blokkform i modellens GUI. Man kan velge mellom blokkformene: rektangel, ellipse, sfære og disk. Dersom ingen blokkform er definert vil simuleringer bli kjørt med ellipse eller sfærisk blokkform, avhengig av dimensjon på blokken.</p>
<p>Bakkeruhet</p> <ul style="list-style-type: none"> - rg70.asc - rg20.asc - rg10.asc 	<p>Unikt for RF3D er bruken av tre rasterfiler for å definere bakkeruheten i helningen. Bakkeruheten representerer hindringer i terrenget nedover helningen, og blir bestemt (fortrinnsvis gjennom feltarbeid) ved å måle normalhøyde relativt til helningen av hindringer langs helningen (Figur 11). Verdiene kan variere fra 0-100 meter, dersom det er null hindringer er verdien 0 meter, og ruhet på 100 meter kan brukes for å få blokken til å stoppe. De tre raster-filene er såkalt sannsynlighetsklasser av bakkeruheten i et definert og homogent polygonområde, hvor rg70 representerer 70% av bakkeruheten, rg20 representerer 20% og rg10 representerer 10%.</p>  <p><i>Figur 11: Illustrasjon av hvordan bakkeruheten måles i Rocyfor3D (Dorren, 2016).</i></p> <p>Bakkeruheten definerer den tangentielle restitusjonskoeffisienten (R_t) som bestemmer energitap under nedslag. Den påvirker ikke terrenghøyden eller skråningsvinkelen i en raster celle. Bakkeruhet er en av de viktigste inngangsparametrene i modellen, og valg av verdier må gjøres nøye da RF3D er svært sensitive for disse (Dorren, 2016).</p>

soiltype.asc	Det kan velges mellom 8 ulike bakketyper med definerte normal restitusjonskoeffisientverdier (Rn) (Tabell 8). Rn beskriver elastisiteten på underlaget. En høy Rn-verdi representerer lav elastisitet (hardt underlag), og vil resultere i minimale penetrasjonsdybder under nedslag av blokk.
Alternative inngangsparametere	
Steinspranggjerde - Net_number_asc - Net_energy_asc - Net_height.asc	Kan inkluderes. Definerer nummerering, energikapasitet, og høyde på nettet (målt normalt på bakken). Det samles da data langs barrieren, som for eksempel treffvinkel, spranghøyde, kinetisk energi, absolutt hastighet og rotasjonshastighet. Dersom man setter net_height og net_energy lik 0, samler man inn data for hver av blokkene som passerer barrieren uten at blokkene blir påvirket av barrieren.
Skog	Kan inkluderes

Tabell 8: Oversikt over bakketyper I RF3D og tilhørende Normal restitusjonskoeffisient verdier (Rn) (Dorren, 2016).

Bakketype	Beskrivelse	Gjennomsnittlig Rn-verdier	Rn-verdier
0	Elv, sump, eller materiale der en stein kan trenge helt gjennom	0	0
1	Fint jordmateriale (dybde > 100cm)	0,23	0,21 - 0,25
2	Fint jordmateriale (dybde < 100cm) eller miks av sand og grus miks i dalen	0,28	0,25 - 0,31
3	Ur (blokkdiameter < 10 cm), eller medium kompakt jord med små steinfragmenter eller skogsvei	0,33	0,30 - 0,36
4	Ur (blokkdiameter > 10 cm) eller kompakt jord med større steinfragmenter.	0,38	0,34 - 0,42
5	Berggrunn med tynt forvitret materiale eller dekket av jord.	0,43	0,39 - 0,47
6	Berggrunn	0,53	0,48 - 0,58
7	Asfalt/vei	0,35	0,32 - 0,39

Resultatfiler og analysemuligheter

RF3D produserer 12 ulike resultatfiler (Dorren, 2016), og de mest relevante for dimensjonering av steinspranggjerdene er vist i Tabell 9. Spranghøyder er målt i normal retning fra bakken til massesenteret til alle blokker som passerer gjennom rastercellen. RF3D tilbyr ingen statistiske verdier for hastigheten av blokken, utenom maks simulert hastighet per rastercelle. Mulighet for maks hastighet er inkludert (etter oppfordringer), men det anbefales å bruke denne forsiktig da det ikke finnes informasjon om den statistiske fordelingen. For dimensjonering av sikringstiltak anbefales det å bruke 95-persentilen av energiverdiene og spranghøydene (Dorren, 2016).

Tabell 9: Oversikt over relevante resultatfiler for dimensjonering av tiltak i RF3D (Dorren, 2016).

Resultatfiler	Kommentar
E_mean.asc:	Gjennomsnittet av de maksimale kinetiske energiverdiene (translasjonell + rotasjon i kJ) av alle de simulerte blokkene per celle.
E_50.asc, E_90.asc, E_95.asc, E_98.asc, E_99.asc	Representerer persentiler av de maksimale kinetiske energiverdiene (translasjonell + rotasjon) av alle de simulerte blokkene per celle.
E_95CI.asc	95 % konfidensintervall. Verdiene kan betraktes som den maksimale energiverdien registrert i den gitte cellen.
Ph_mean.asc:	Gjennomsnitt av maksimale passeringshøyder.
Ph_50.asc, Ph_90.asc, Ph_95.asc, Ph_98.asc, Ph_99.asc:	Representerer persentiler av de simulerte spranghøydene per celle.
Ph_95CI.asc	95 % konfidensintervall av alle maksimale spranghøyder per celle. Verdiene kan betraktes som den maksimale spranghøyden registrert i den gitte cellen.

Etter endt simulering kan brukeren visualisere en kurve av energier, spranghøyder og utløpssoner langs en 2D-profil i programvaren. I tillegg er det mulig å legge inn barriere i simuleringene (se alternative inngangsparametere i Tabell 7). Utover dette tilbyr RF3D ingen analysemuligheter. Alle resultatfiler er i ascii-format og kan åpnes direkte og visualiseres i GIS programvare hvor videre behandling og analyse av resultater kan gjøres.

2.5.3 RocFall2

Rocfall2 (RF) er et 2D statistisk analyseprogram designet for vurdering av steinsprangfare utviklet av Rocscience.inc (Rocscience, 2023e). RF beregner energi, høyde og hastighet langs en profil i skråningen/fjellsiden, og programmet visualiserer fordelingen i grafer og histogrammer, samt kalkulerer statistiske verdier av dataene. RF tilbyr to ulike

analysemodeller for simulering av steinsprang: lump mass og rigid body. Disse bruker ulike simuleringssinnstillinger og analysemetoder, men hovedforskjellen er hvordan blokken er definert (Rocscience, 2023k). I lump mass behandles blokken som en enkel rund partikkelmasse hvor blokken verken har størrelse eller form, men massen er tatt hensyn til for å kalkulere kinetisk energi. I 2014 ble en ny versjon av programmet sluppet, RocFall 5.0, hvor rigid body-tilnærming var inkludert. I denne tilnærmingen behandles blokken som en geometrisk fast form med tilnærmet null deformasjon, og tillater brukeren å velge mellom en rekke forskjellige forhåndsdefinerte blokkformer (Rocscience, 2023b).

Beregning av nedslag

RF bruker ulike beregningsprinsipper for lump mass og rigid body, og Tabell 10 viser en oppsummert oversikt over hovedforskjellene mellom disse i RF (Rocscience, 2023b).

Tabell 10: Hovedforskjell mellom lump mass og rigid body i RocFall2 (RF) (Rocscience, 2023b).

	Lump mass i RF	Rigid body i RF
Blokk	Simulert som en partikkel uten størrelse og form.	Simulert som en en gitt geometrisk form og størrelse.
Normal Restitusjonskoeffisient (Rn)	Hastighetsbasert.	Energibasert.
Tangentiell Restitusjonskoeffisient (Rt)	Hastighetsbasert.	Ikke brukt med mindre "bruk tangentiell CRSP damping" er aktivert og er energibasert. Friksjon er eneste kilden til energitap i tangentiell retning dersom CRSP ikke er aktivert. Dersom CRSP er aktivert er tangentiell restitusjon aktivert.
Dynamisk friksjon	Gitt som en vinkel (φ) og brukes når blokken sklir.	Gitt som en koeffisient og brukes ved sammenstøt og når blokken sklir.
Rullende friksjon	Ikke brukt	Brukes når blokken ruller. Representerer energien som går tapt til andre faktorer enn dynamisk friksjon, som plastisk deformasjon og glidning på kontaktflaten (Rocscience, 2023f).
Andre muligheter	Bruk rotasjonshastighet	Avanserte

		friksjonsparametere: "Scarring" og viskoplastisk bakke drag kan inkluderes og brukes når blokken sklir på underlaget. Damping fra skog.
--	--	--

Restitusjonskoeffisienter i RF representerer bakketypens evne til å dempe blokken basert på på bakketypens hardhet/elasticitet. I lump mass er normal restitusjonskoeffisient (R_n) av et materiale definert som det negative forholdet mellom utgående hastighet ($V_{n,u}$) og innkommende hastighet ($V_{n,i}$) i m/s, hvor utgående hastighet virker i motsatt retning av innkommende hastighet (Formel 8) (Rocscience, 2023d).

Formel 8: Normal Restitusjonskoeffisient (R_n) i RocFall2 med lump mass analysemodell. $V_{n,u}$ er utgående normal hastighet og $V_{n,i}$ er innkommende normal hastighet.

$$R_n = \frac{-V_{n,u} \text{ [m/s]}}{V_{n,i} \text{ [m/s]}}$$

Tangentiell restitusjonskoeffisient (R_t) brukes i lump, og er definert som (dersom "consider rotational velocity" ikke er aktivert) forholdet mellom utgående tangentiell hastighet ($V_{t,u}$) og innkommende tangentiell hastighet ($V_{t,i}$) i m/s, hvor utgående tangentiell hastighet er i samme retning som innkommene tangentiell hastighet (Rocscience, 2023d) (Formel 9).

Formel 9: Tangentiell Restitusjonskoeffisient (R_t) i RocFall2 med lump mass analysemodell. $V_{t,u}$ er utgående tangentiell hastighet og $V_{t,i}$ er innkommende tangentiell hastighet.

$$R_t = \frac{V_{t,u} \text{ [m/s]}}{V_{t,i} \text{ [m/s]}}$$

Dersom "calculate friction from R_t " er aktivert, for lump mass simuleringer, beregnes friksjonvinklen (φ) ved hjelp av R_t (Formel 10).

Formel 10: Friksjonvinkel (φ) i RocFall2 med lump mass analysemodell dersom "calculate friction angle from R_t " er aktivert. R_t er tangentiell restitusjonskoeffisient (Rocscience, 2023b).

$$\varphi = \arctan \frac{1 - R_t}{R_t} \text{ [grader]}$$

I rigid body er normal restitusjonskoeffisient (R_n) definert som kvadratroten av den negative forholdet mellom utgående energi (E_u) og innkommende energi (E_i) i kJ (Rocscience, 2023d) (Formel 11)

Formel 11: Normal Restitusjonskoeffisient (Rn) i RocFall2 med rigid body analysemodell. Hvor E_u er utgående energi og E_i er innkommende energi.

$$Rn = \sqrt{\frac{-E_u \text{ [kJ]}}{E_i \text{ [kJ]}}}$$

Nedslagsvinkel og -hastighet, samt dynamisk friksjonskoeffisient bestemmer bevegelsen av blokken ved nedslag i simuleringer med rigid body (Rocscience, 2023d). Utgående hastigheter beregnes ved hjelp av impulser. Normale impulser bestemmes ved hjelp av Rn og tangentielle impulser er proporsjonale med de normale impulsene.

RF tilbyr ulike muligheter for skalering av den normale restitusjonskoeffisienten (Rocscience, 2023i). Man kan velge mellom "scale Rn by velocity" eller "scale Rn by mass". Førstnevnte justerer Rn ned når hastighet under sammenstøt økes, mens sistnevnte tar hensyn til massen til blokken. Ved høy blokkhastighet kan det eksempelvis forventes plastisk deformasjon av underlaget, eller knusing av blokken ved sammenstøt, og da bør normalrestitusjonskoeffisienten ha en lavere verdi, som kan oppnås ved hastighetsskalering. Det er derimot ikke anbefalt å skalere Rn med begge alternativene.

Inngangsparametere

I RF simuleres steinsprang i 2D hvor det legges inn et helningsprofil. Når helningsprofilen legges inn i modellen kan det oppstå veldig mange punkter i profilet, og dette kan føre til utfordringer med eksempelvis redigering av bakketyper eller økt prosesseringstid. Profilet kan derimot justeres ved bruk av funksjonen "simplify slope" (Rocscience, 2023j), som reduserer antall punkter ved å definere ønsket prosentvis reduksjon fra opprinnelig antall punkter. Standard prosentvis reduksjon er 20% .

I programvaren defineres ulike bakketyper langs profilet, som for eksempel "fast fjell", "ur" og "jord" (Rocscience, 2023g). Hver materialtype gis verdier for Rn og Rt, hvor det tas utgangspunkt i standardverdier, men disse kan justeres ved behov eller dersom man oppretter nye materialtyper som ikke ligger inne i programmet fra før. Egenskaper til blokken defineres i programmets "rocktype library" (Rocscience, 2023g). Her kan man definere masse på blokken, og ved bruk av rigid body kan man også definere blokkform.

RF tilbyr simuleringer med ulike sikringstiltak med funksjonene «add barriers» og «add berms» (Rocscience, 2023h). «Barriers» er et linjesegment som forestiller ett steinspranggjerd, mens «berm» forestiller voller hvor ulike geometrier kan velges og designes. Sikringstiltakene kan plasseres hvor som helst langs skråningen for å stoppe blokken eller absorbere noe av energien til blokker som passerer barrieren. I tillegg tilbyr RF simulering med funksjonen «add data collectors». «Data collectors» er et linjesegment som samler informasjon om blokkene som passerer linjen. Datainnsamlingen registrerer hastighet, kinetisk energi, vertikal plassering og horisontal plassering av alle blokker som passerer

gjennom den, og brukes når man ønsker å få informasjon om et bestemt sted, men ikke vil endre sprangbanen blokken tar når de beveger seg nedover bakken.

Resultatfiler og analysemuligheter

RF har en rekke grafiske verktøy som lar deg visualisere resultater av simuleringene (Rocscience, 2023g). På et hvilket som helst sted langs sprangbanen kan du få en grafisk fordeling av:

- Spranghøyde (Målt normalt på bakken til blokkens massesenter)
- Total kinetisk energi (Translasjonell kinetisk energi + Roterende kinetisk energi)
- Translasjonell kinetisk energi
- Roterende kinetisk energi
- Translasjonshastighet
- Rotasjonshastighet

Resultatfilene kan eksporteres til Excel-format for lagring av data og eventuel videre analyse.

RF er den modellen som tilbyr flest analysemuligheter blant de utvalgte modellverktøyene (Rocscience, 2023k). Simuleringsresultatet kan fremstilles i flere statistiske former med histogrammer og grafer som deretter kan eksporteres til Excel-format. Programvaren tilbyr en sensitivitetsanalyse-funksjon for vurdering av sikringstiltak, og lar brukeren automatisk variere plassering, høyde, vinkel eller kapasitet til steinspranggjerdet (Rocscience, 2023c). I tillegg har RF en egen rapportgenerator som gir et sammendrag av modell- og analyseinformasjon, som kan eksporteres til PDF-format (Rocscience, 2023k). Informasjon som ønskes i rapporten legges til løpende ved å klikke "add view to your report".

2.5.4 Sammenligning av modellene

Tabell 11 viser en oppsummerende sammenligning av modellverktøyene

Tabell 11: Hovedforskjeller mellom RAMMS Rockfall, Rockyfor3d og RocFall2.

	RAMMS Rockfall	Rockyfor3D	RocFall2
Analysemodeller	Rigid body.	Rigid body og mulighet for "Rapid Automatic Simulation" (RAS).	Rigid body eller lump mass.
Romlig dimensjon	3D	3D	2D
Beregning av nedslag	Beregnes deterministisk med	Beregnes stokastisk med bruk av sfærisk	Beregnes stokastisk.

	"hard-contact" og rigid body tilnærming ved bruk av friksjonsparametere og kontakrefter. Denne tilnærmingen hensyntar blokkens geometriske form og konfigurasjonen under nedslag.	blokk.	I lump mass er blokken et punkt med en gitt masse (form er ikke hensyntatt) I rigid body er blokken en geometrisk form.
Simulering av blokkens bevegelsesformer	Sprang, rulling og gliding er inkludert. Glidning av blokk er inkludert ved bruk av avanserte friksjonsparametere scarring og drag.	Sprang og rulling er inkludert. Gliding er ikke inkludert.	Lump mass simulerer sprang, og gliding med bruk av friksjonsvinkel. Rulling er ikke inkludert Rigid body simulerer sprang, og gliding ved bruk av dynamisk friksjonskoeffisient og og rulling ved bruk av rullende friksjonskoeffisient. Rigid body muliggjør en mer detaljert beregning av gliding, ved bruk av avanserte friksjonsparametere (scarring og drag) inspirert av RR.
Normal Restitusjonskoeffisient (Rn)	Hastighetsbasert. Representerer bakketypens hardhet.	Hastighetsbasert. Representerer bakketypens hardhet.	Hastighetsbasert i lump mass og energibasert i rigid body, Representerer bakketypens hardhet i normal retning.
Tangentiell Restitusjonskoeffisient (Rt)	Ikke inkludert, da den antas fraværende.	Hastighetsbasert Representerer	Hastighetsbasert i lump mass.

		bakkeruheten i terrenget.	Energibasert i rigid body, men er ikke brukt med mindre "bruk tangentiell CRSP demping" er aktivert. Friksjon er eneste kilde til energitap i tangentiell retning dersom CRSP ikke er aktivert. Dersom CRSP er aktivert er tangentiell restitusjon aktivert. Representerer bakketypens hardhet i tangentiell retning
Bakkeruhet som egen inngangsparameter	Ikke inkludert	Inkludert	Kan inkluderes
Spranghøyder	Målt vertikalt på bakken til blokkens massesenter	Målt normalt på bakken til blokkens massesenter	Målt normalt på bakken til blokkens massesenter
Simulering med skog	Kan inkluderes	Kan inkluderes	Kan ikke inkluderes
Simulering med sikringsbarriere	Kan ikke inkluderes i simuleringen, men RR tilbyr analysemuligheter for datainnsamling av passerte blokker som kan gjøres i etterkant av simuleringen.	Kan inkluderes, både for å se effekten av sikringstiltak og for å samle data av blokker som passerer. Tilbyr simulering med steinspranggjerd	Kan inkluderes, både for å se effekten av sikringstiltak og for å samle data av blokker som passerer Tilbyr simulering med steinspranggjerd og voller.
Analysemuligheter i programvaren	Tilbyr flere analysemuligheter og statistiske fremstillinger av resultat.	Kan visualisere en kurve av energier, spranghøyder og utløpssoner langs en 2D-profil, men ingen videre analysemuligheter.	Er den modellen som tilbyr flest analysemuligheter. RF har også en rapportfunksjon som gjør det mulig å generere en oppsummerende rapport av analysene som blir gjort.

3 Metode

Dette kapittelet beskriver utvalgte studieområder; Hjelle og Barstadvika, samt fremgangsmåte for modellering med fokus på simuleringsinnstillinger og behandling av resultatfiler

3.1 Studieområder

To områder er valgt ut for å teste og sammenligne de utvalgte modellverktøyene: Barstadvika (Figur 12) og Hjelle (Figur 13). Begge studieområder er lokalisert i Nordfjordregionen i Vestland fylke (Figur 14) hvor steinsprangaktiviteten er høy. Utvelgingsprosessen er basert på følgende kriterier:

- Området må ha etablerte faresoner i henhold til byggeteknisk forskrift.
- Steinsprang må være dimensjonerende faretype for faresoner
- Dokumentert steinsprangaktivitet
- Ulik terrengutforming og helningsgeometri

Faresonekartlegging for områdene er gjennomført iht. TEK10, som er en eldre versjon av TEK17, men de opererer med samme årlig nominelle sannsynligheter for skred; 1/100, 1/1000 og 1/5000



Figur 12: Studieområde Barstadvika.

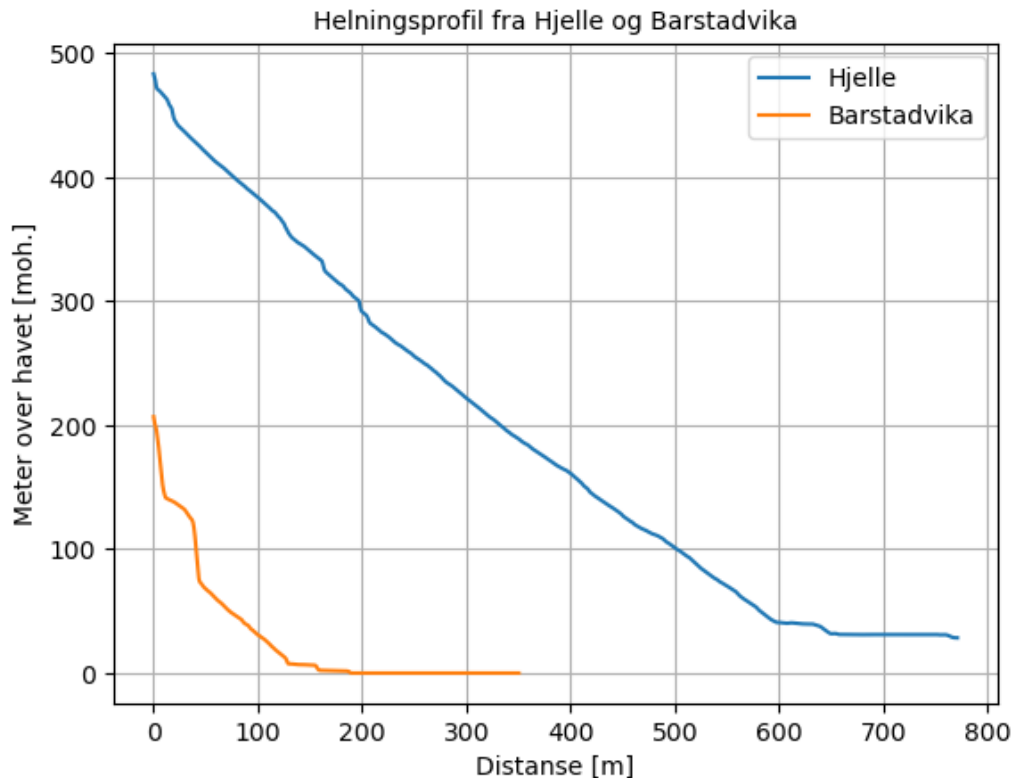


Figur 13: Studieområde Hjelle.



Figur 14: Lokaltet over studieområder. Barstadvika, Kinn kommune, i vest og Hjelle, Stryne kommune, i øst.

Det er valgt ut to områder med ulik helningsgeometri, dette gjør det mulig å undersøke hvordan modellene presterer under forskjellige forhold. Figur 15 viser utvalgte helningsprofiler for Barstadvika og Hjelle. Barstadvika har en trappelignende helningsgeometri, mens Hjelle har en jevn helning som strekker seg over en lengre distanse, både i høyde og lengde.



Figur 15: Helningsprofil fra Barstadvika og Hjelle.

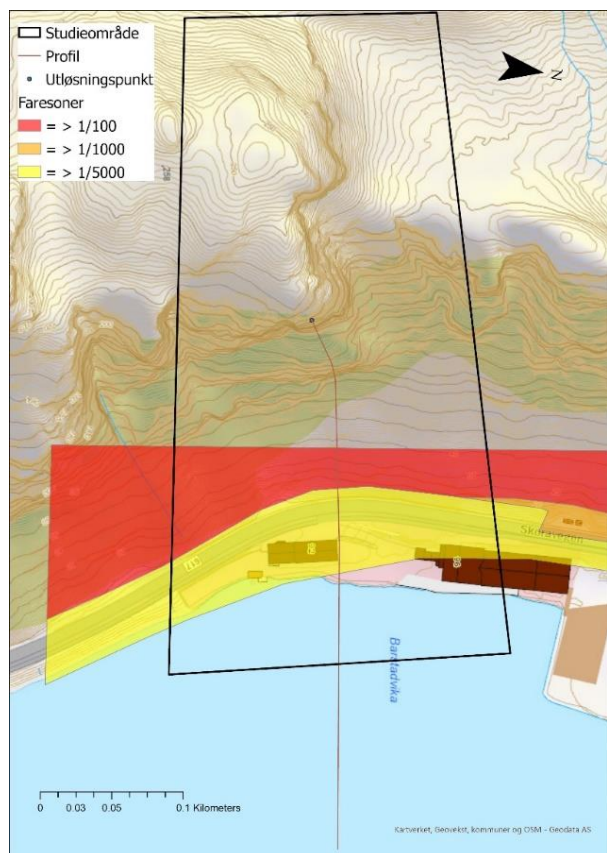
3.1.1 Barstadvika

Barstadvika er del av en større faresonekartlegging av Kinn kommune, gjennomført av SWECO på oppdrag fra NVE (SWECO, 2017). Det har oppstått flere steinspranghendelser i området, og kartleggingen baserer seg på tidligere utredninger gjennomført av SVV og Multiconsult (Øystese & Åsvold, 2009; SVV, 2013, 2014b, 2014a). I tillegg er det etablert steinspranggjerd langs fylkesveg 617, som ble satt opp året 2014/2015 (SVV, 2014b). Steinspranggjerdet i det utvalgte området har en kapasitet på 2000 kJ og er 4 meter høyt (SWECO, 2017).

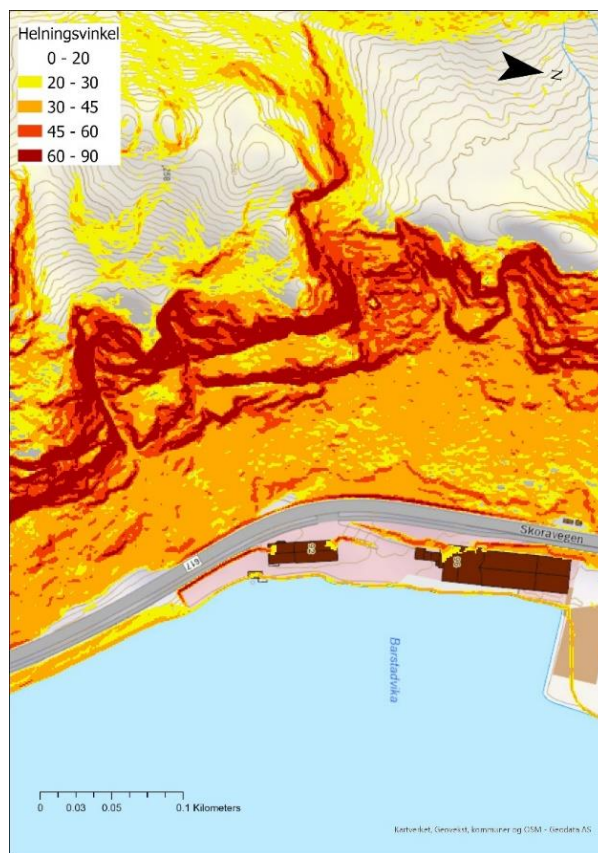
Figur 16 viser faresonene i Barstadvika. SWECO vurderer at den årlige nominelle sannsynligheten for steinsprang er større enn 1/5000 for veien, og lengst sør ned til sjøen (SWECO, 2017). Videre vurderer de at skred med årlig sannsynlighet større enn 1/100 og 1/1000 (respektivt rød og oransje faresone) vil stoppe i steinspranggjerdet. Skredfaren for kjørende langs veien er ikke oppgitt.

Terrenget går fra havnivå i øst og opp bratte fjellsider lang fylkesveg (Figur 17). Den nedre delen av skråningen er 30-45 grader, mens øvre del består av vertikale skrenter som er avbrutt av en rekke skar og kløfter. Ved 200 høydemeter slaker terrenget ut. Vegetasjonen i området består av løvskog og åpne partier med ur eller berg (granodirittisk båndet gneis) (SWECO, 2017). Løsmassene i området består primært av morene og skredavsetninger i nedre del av skråningen, og bart fjell høyere oppe (NGU, 2022). På nedsiden av veien er det fyllmasser. I

tillegg er det langs vegen satt opp tørrmur, med skråning bak, mot opprinnelig terreng hvor steinspranggjerdet er plassert (Figur 19).



Figur 16: Faresonekart over Barstadvika, og valgt utløsningspunkt og profil.



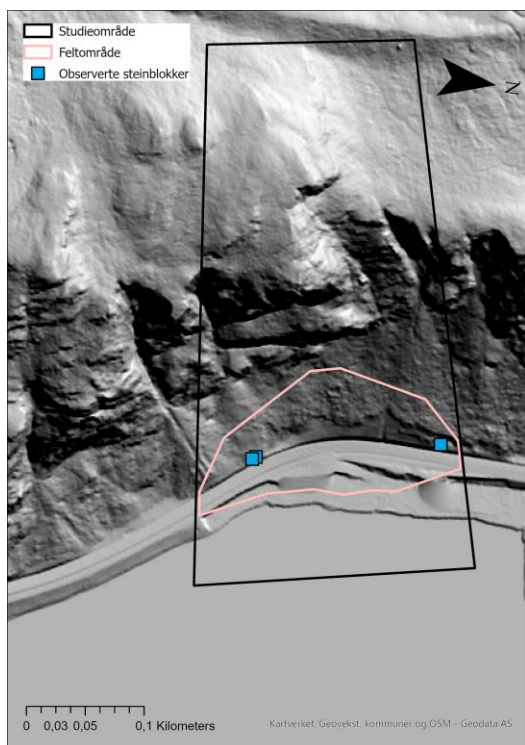
Figur 17: Helningskart over Barstadvika.

I felt er det observert ur i nedre halvdel av skråningen (under ca 100 høydemeter), og ferske spor av steinsprangaktivitet hvor 3 blokker ($< 1 \text{ m}^3$) har truffet steinspranggjerdet (Figur 18). Flere steinspranghendelser er registrert i området og det er gjennomført både spyling og rensk for å redusere risikoen for steinsprang (SWECO, 2017; Øystese & Åsvold, 2009; SVV, 2013, 2014b, 2014a). Tiltakene er gjennomført før SWECOs faresonekartlegging i 2017 og faresonene antas derfor som gjeldende i dag.

I 2009 bistod Multiconsult Statens vegvesen (SVV) med vurdering av skredfare i etterkant av et steinsprang i Barstadvika (Øystese & Åsvold, 2009), hvor en blokk (dimensjon 0.6/0.8/0.2 m) lå på gangveien nedenfor vei. I tillegg var det spor av en annen blokk som trolig havnet i sjøen. Løsneområdet for steinspranget var ca. 70 meter høyde over vei (Øystese & Åsvold, 2009).

Det er registrert 9 steinspranghendelser i NVEs skredregister (NVE, 2022). Disse har oppstått mellom år 2011 til 2016 i Barstadvika og rundt 500 metersørover, langs vei, fra studieområdet. Hendelsene strekker seg derfor noe ut av utvalgt studieområde, men informasjonen bidrar til en helhetsforståelse av steinsprangaktiviteten i området. To hendelser er registrert med stedsnavn Raudeberg og Raudebergstranda, men kartfestet i Barstadvika. I følge SVV (2013)

har flere hendelser oppstått i Barstadvika året 2013 enn det som kommer frem i NVEs database. Året 2014 kom 4-5 blokker ned på veien i en bredde på rundt 30 meter med blokkstørrelse på 0.5-1 m³ (SVV, 2014b, 2014a). I tillegg ble det observert ustabile blokker i skogen ovenfor veien, som trolig har kommet fra samme steinspranghendelse. Steinspranget løsnet rundt 200 meter over vei. SVV (2014b) vurderte da fjellsiden langs Barstadvika som oppsprukket og at steinsprang langs strekningen ikke kan utelukkes. På bakgrunn av dette ble strakstiltak som spyling og rensk av fjellveggen gjennomført.



Figur 18: Observerte blokker fra felt i Barstadvika.



Figur 19: Fjellsiden i Barstadvika. Langs veien er det satt opp steinspranggjerdje og tørrmur med skråning bak mot opprinnelig terreng. Bildet tatt i felt 3. oktober 2022.

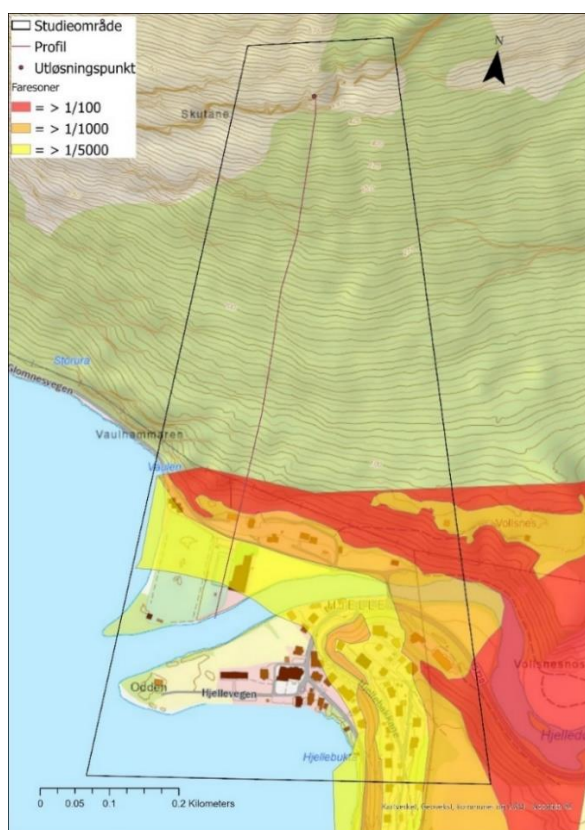
3.1.2 Hjelle

På oppdrag fra NVE utførte NGI skredfareutredning av utvalgte områder i Stryn kommune (NGI, 2017b). Utredningen resulterte i en ny detaljert skredutredning av Hjelle i Oppstryn (NGI, 2017a). Faresonene er utarbeidet i henhold til TEK10. Generelt er Hjelle et område med varierende skredproblematikk og er utsatt for de fleste skredtyper (f.eks. steinsprang, snøskred, fjellskred og jordskred). For utvalgt fjellside i Hjelle er den dimensjonerende skredfaren steinsprang og faresonekart for området er vist i Figur 20.

På nordsiden av Hjelle stiger terrenget bratt opp til Glomnesnakken som befinner seg 800 til 1000 m.o.h (Figur 21). Mellom ca. 450-600 m.o.h går en skrå langsgående brattkant i fjellsiden under Glomnesnakken, med navnet Skutane, som utgjør det mest markerte kildeområdet for steinsprang (Figur 23). Fjellsidene er delvis skogkledd opp til ca. 600 m o.h.,

og varierer mellom bar- og løvskog, og av brattkanter, ur og bart fjell (NGI, 2017a). Rundt år 1600-1950 var forholdene derimot annerledes med stor skogavvirkning og tendenser til overbeiting. Berggrunnen består hovedsakelig av diorittisk til granittisk gneis (NGU, 2022). Fra NGIs skredfareutredning kommer det frem at fjellssidene i Hjelle består av flere sprekkesett med varierende orientering (NGI, 2017a). Løsmassene består av bre- og elveavsetninger (marin grense er rundt 50-70 m.o.h.), med skredavsetninger og forvittringsmateriale i nedre del og bart fjell høyere opp (NGI, 2017a; NGU, 2022).

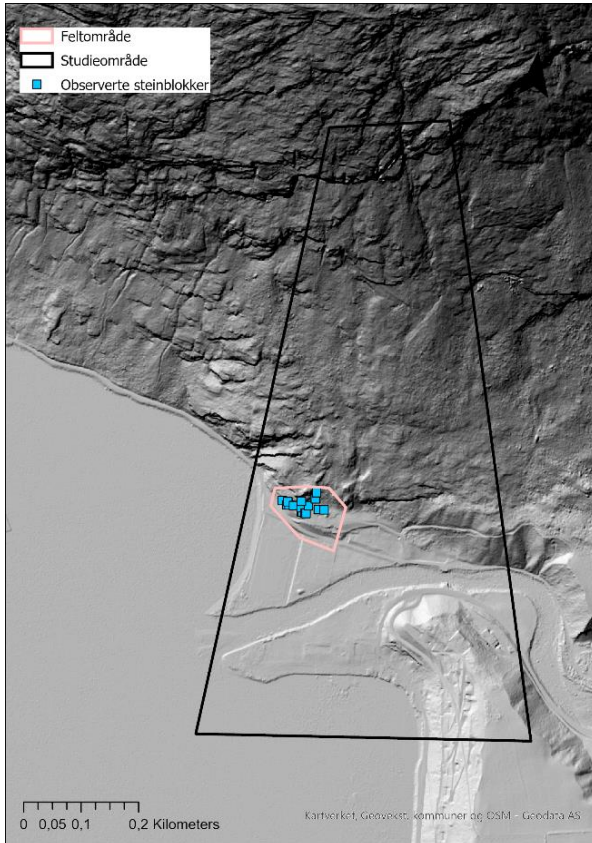
I felt ble flere blokker fra tidligere hendelser observert (Figur 22). De observerte blokkene har en størrelse på 1-4 m³, samt noen større blokker på over 10 m³. I tillegg er det fra tidligere skredutredninger identifisert blokker videre østover i faresone 1/1000 og 1/100 (NGI, 2017b). Ingen steinspranghendelser er registrert i skredhendelsesdatabasen til NVE (NVE, 2022).



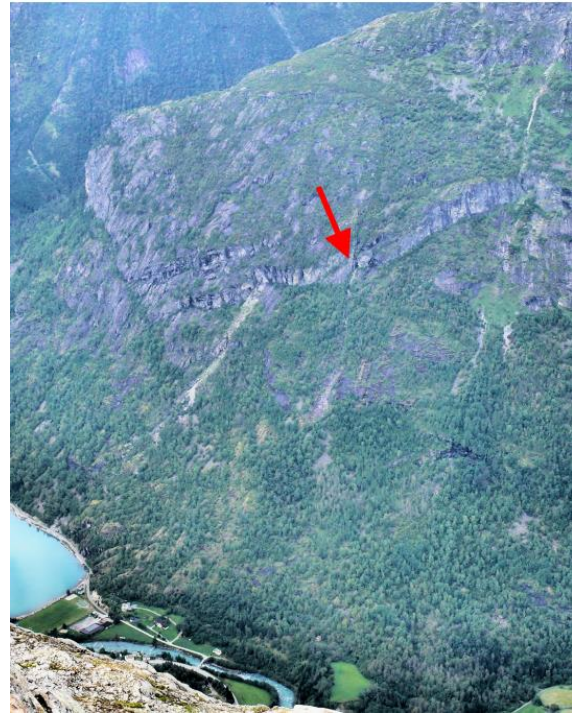
Figur 20: Faresonekart over Hjelle, og valgt utløsningspunkt og profil.



Figur 21: Helningskart over Hjelle.



Figur 22: Observerte blokker fra felt i Hjelle.



Figur 23: Skutane, en langsgående brattkant i fjellsiden under Glomnesnakken som er kildeområde for steinsprang. Bilde: NGI (NGI, 2017a).

3.2 Feltarbeid

For å få mest mulig realistisk resultat i modelleringen er feltarbeid gjennomført. Dette gir supplerende informasjon ved bestemmelse av inngangsverdier og simuleringsinnstillinger til modellene. Hovedfokus under feltarbeidet var å kartlegge tidligere steinsprangaktivitet, identifisere antatte skredblokker og deres plassering, form og størrelse, samt kartlegge bakketype og bakkeruhet i utløpsområdet.

I forkant av feltarbeidet er tidligere skredfareutredning og annen relevant litteratur av de utvalgte områdene gjennomgått. Feltarbeidet ble utført av undertegnede den 3. og 4. oktober 2022, og besto i følgende aktiviteter:

1. Observasjoner med kikkert: kikkert gjør det mulig å studere utløsningsområder og annet terreng som ikke er mulig å oppsøke grunnet ulendt og bratt terreng.
2. Fotografering: Dette gjør det mulig å studere områdene i etterkant, samt dokumentere relevante/merkbare funn.
3. Målinger:
 - Tidligere steinsprangaktivitet: Urformasjon og ferske blokker er tegn på tidligere steinsprangaktivitet. Observerte antatte skredblokker er koordinatfestet ved bruk av

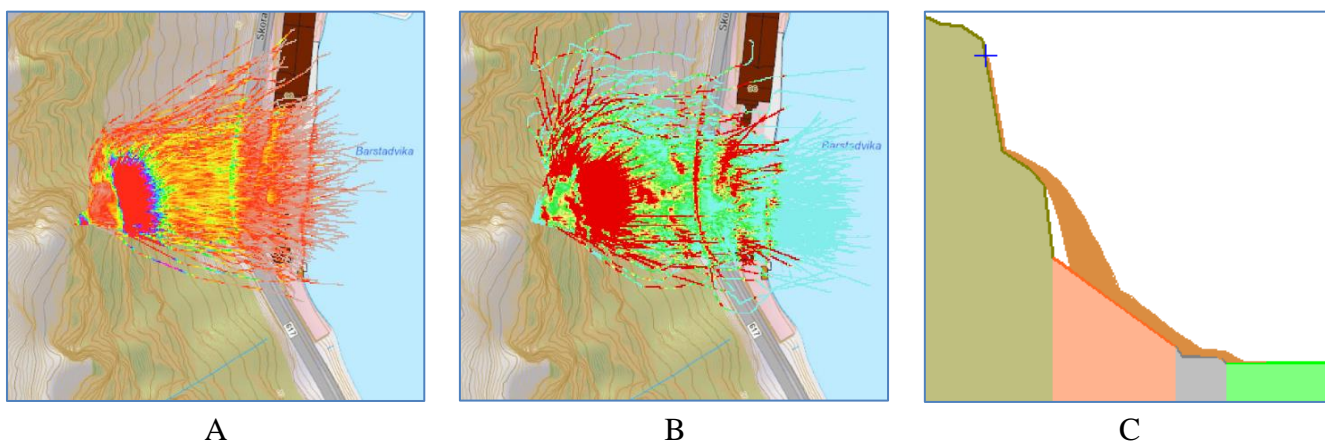
GPS og behandlet i GIS og er vist i Figur 18 for Barstadvika og Figur 22 for Hjelle. Dette gir indikasjoner på hvor langt blokkene går. En mulig feilkilde er forveksling av steinsprangblokker med moreneblokker.

- Karakteristikk av blokker: Størrelse og form er observert og målt i felt, langs profil, ved hjelp av målebånd og tråd.
- Bakkeruhet: RF3D krever observasjoner av bakkeruhet og dette ble målt ved å se nedover langs profil og måle blokkenes høyder normalt til underlaget (Figur 11).

3.3 Modellering

3.3.1 Overordnet metodikk

Modellverktøy som er vurdert i denne studien er Rockyfor3D v5.2 (RF3D), Ramms Rockfall v1.7 (RR), og RocFall2 v8.0 (RF) (Figur 24). To studieområder, med ulik helningsgeometri (Figur 15), er valgt ut for å teste modellene for å vurdere påvirkning av ulikt terreng.



Figur 24: De tre modellene A) RAMMS Rockfall visualisert i ArcGIS, B) Rockyfor3D visualisert i ArcGIS, C) RocFall2 vist i RocFall2 programvaren. For RR og RF3D representerer fargene sprangbaner og ulike verdier for energinivå, vist i GIS. For RF representerer fargen kun sprangbaner.

Forberedelse av inngangsparametere for modellene er gjennomført i ArcGIS Pro 2.9.0 (Esri Inc., 2021) og/eller i modellens programvare. Kartesisk koordinatsystem ETRS 1989 UTM Zone 33N er brukt. RF3D og RR bruker DEM til å beskrive topografien i området. DEM er hentet fra hoydedata.no med data fra Kartverket (2022).

Modellene er først klargjort basert på beste vurdering og kartlagt terreng, og danner utgangspunkt for simuleringer. Med kartlagt terreng menes det at terrenget er manuelt kartlagt og delt inn i bakketyper (og ruhet for RF3D) etter observasjoner gjort fra feltarbeid, bruk av fjellskyggekart og løsmassekart, tidligere skredfareutredninger og veiledning fra

brukermanualene. Deretter er en sensitivitetsanalyse av modellene gjennomført, hvor ulike inngangsparametere er justert.

Punkt er definert som utløsningsområde for alle modellene så langt dette lot seg gjøre. Punkt ble valgt for å få best mulig sammenligning med RF, som simulerer steinsprang i 2D. Utvalgt løsnepunkt er plassert slik at steinspranget går over kartlagt terreng fra felt vist i Figur 16 for Barstadvika og Figur 20 for Hjelle. RF3D har ikke punkt som valgmulighet for utløsningsområde, og det er derfor valgt et areal over et lite område som representerer tilsvarende utløsningspunkt i RR og RF. Et mindre areal er også brukt som utløsningsområde i enkelte simuleringer i RR for å få nok data langs profilet (mer om dette i diskusjon kap.5.1.2).

For alle simuleringer er tettheten til blokken satt til 2700 kg/m^3 . I RR og RF3D er DEM med 1 meter oppløsning brukt. Høy DEM-oppløsning er valgt da vurdering og plassering av sikringstiltak bestemmes på detaljnivå, og det kreves derfor en digital terrengmodell (DEM) med høy oppløsning. Helningsprofil i RF er også basert på tilsvarende DEM-oppløsning.

Simuleringsinnstillinger, hvor kartlagt terreng er brukt, og klargjøring av modell for hver av modellverktøyene er beskrevet i de neste delkapitlene. Deretter er simuleringsinnstillinger i sensitivitetsanalysen representert.

3.3.2 RAMMS Rockfall simuleringsinnstillinger

Simuleringer i RR er med Rigid Body analysemodell. Det er gjennomført 7 simuleringer med RR per område hvor simulering 1 er basert på beste vurdering og kartlagt terreng og i simulering 2-7 er utvalgte inngangsparametere justert. For alle simuleringer er det brukt en ekstra fallhøyde på 5 meter for å kunne starte utløsningen.

For Hjelle, i simulering 1, 5 og 6 er utløsningspunkt brukt og antall blokkorienteringer er satt til 1000 per celle. Antall utløste blokker per simulering er dermed 1000 blokker. For simulering 2, 3, 4 og 7 er løsneområde definert som areal over et lite område og antall blokkorienteringer er satt til 1. Antall blokksimuleringer tilsvarer dermed antall utløsningsceller som er 2039 stk. For Barstadvika er utløsningspunkt med 1000 blokksimuleringer brukt for alle simuleringer med unntak av simulering 4 (sfærisk blokk). I simulering 4 er areal over et lite område brukt hvor antall blokkorienteringer er satt til 1 og antall blokksimuleringer tilsvarer antall utløsningsceller, som er 689 stk. Areal over et lite område er brukt som løsneområde for å få variasjon i sprangbaner i simuleringer hvor utløsningspunkt ikke gir tilstrekkelig med data langs profil.

Terrengparameterne basert på kartlagt terreng er vist i Tabell 12 for Barstadvika og Tabell 13 for Hjelle.

Tabell 12: RR terrengparametere basert på kartlagt terreng i Barstadvika.

RR - Kartlagt terreng, Barstadvika	
Bakketype	Beskrivelse av utvalgt terreng
Hard	Brukt i områder med berggrunn, ur og asfalt
Medium soft	Sjø (definert som gress for å se utløpslengder)

Tabell 13: RR terrengparametere basert på kartlagt terreng i Hjelle.

RR - Kartlagt terreng, Hjelle	
Bakketype	Beskrivelse av utvalgt terreng
Ekstra hard	Bart fjell
Ekstra hard	Bart fjell med noe vegetasjon
Hard	Ur øvre
Medium hard	Grov ur nedre
Hard	Veg
Medium soft	Gress
Ekstra soft	Sjø/elv

3.3.3 Rockyfor3D simuleringsinnstillinger

Det er gjennomført 8 simuleringer med RF3D per område hvor simulering 1 er basert på beste vurdering og kartlagt terreng. Simulering 2-7 er utvalgte inngangsparametere justert og i simulering 8 er det brukt rapid automatic simulation (RAS). Simuleringer i RF3D er med rigid body analysemodell og for alle simuleringer er det brukt areal over et lite område tilsvarende to utløsningsceller som løsningsområde. Antall utløste blokker per celle i hver simulering er 1000 blokker, det vil si totalt 2000 stk. Terrengparametere basert på kartlagt terreng for Barstadvika og Hjelle er vist i henholdsvis Tabell 14 og Tabell 15.

Tabell 14: RF3D terrengparametere (Bakketype og Ruhet) basert på kartlagt terreng i Barstadvika.

RF3D – Kartlagt Terreng, Barstadvika			
Bakketype	RG70% (m)	RG20% (m)	RG10% (m)
5 - Bergrunn, noe dekket av jord	0	0,05	0,1
4 - Ur (Ø>10cm).	0,2	0,5	0,8
4 ur (Ø>10cm). Ved fot av ur	0,1	0,15	0,2
7 – Vei/asfalt	0	0	0
1 – Jordmateriale. Elv definert som gress for å se utløpslengder)	0	0	0

Tabell 15: RF3D terrengparametere (Bakke type og Ruhet) basert på kartlagt terreng i Hjelle.

RF3D, Kartlagt Terreng, Hjelle			
Bakke type	RG70% (m)	RG20% (m)	RG10% (m)
6 - Berggrunn	0	0	0,05
5 - Berggrunn, noe dekket av jord	0	0,05	0,1
4 - Ur (Ø>10cm). Øvre del av ur	0,25	0,3	0,1
4 - Ur (Ø>10cm). Nedre del av ur	0,3	0,15	3
0 - Elv	100	100	100
7 - Vei/asfalt	0	0	0
1 - Jordmateriale	0	0	0

3.3.4 Rocfall2 simuleringssinnstillinger

Det er gjennomført 8 simuleringer med RF per område hvor simulering 1 er basert på beste vurdering og kartlagt terreng. I simulering 2-7 er utvalgte inngangsparametere justert og i simulering 8 er det brukt lump mass analysemodell med ellers like innstillinger som simulering 1. Alle simuleringer i RF utenom simulering 8 er med rigid body analysemodell. Simuleringssinnstillinger i RF er listet opp under, og terrengparametere basert på kartlagt terreng er vist i Tabell 16 og Tabell 18 for Barstadvika, og Tabell 17 og

Tabell 19 for Hjelle.

Generelt for begge analysemetoder:

- Antall utløste blokker for hver simulering er 1000
- Ekstra terrengruhet ("slope roughness") er 0
- "Scale Rn by velocity" er brukt
- "Simplify slope" er gjennomført to ganger: 20% x 2

Spesielt for rigid body analysemetode:

- Tangentiell CRSP demping er brukt

Spesielt for lump mass analysemetode:

- "Consider Rotational velocity" er brukt
- Friksjonsvinkel " Calculate from Rt" er brukt

Tabell 16: RocFall, rigid body, terrengparametere basert på kartlagt terreng i Barstadvika. Rn er normal restitusjonskoeffisient, Rt er tangentiell restitusjonskoeffisient, ϕD er dynamisk friksjon og ϕR er rullende friksjon. Standardavviket (σ) til normalfordelingen er oppgitt i parentes.

RF med rigid body - Kartlagt terreng - Barstadvika				
Bakketype	Koeffisienter			
	Rn (σ) [-]	Rt (σ) [-]	ϕD [-]	ϕR [-]
Bedrock outcrops	0,35 (0,04)	0,85 (0,04)	0,50	0,15
Talus cover	0,32 (0,04)	0,80 (0,04)	0,50	0,30
Asphalt	0,44 (0,04)	0,71 (0,04)	0,56	0,42
Soil	0,30 (0,04)	0,81 (0,04)	0,56	0,59

Tabell 17: RocFall, rigid body, terrengparametere basert på kartlagt terreng i Hjelle. Standardavviket (σ) til normalfordelingen er oppgitt i parentes. Rn er normal restitusjonskoeffisient, Rt er tangentiell restitusjonskoeffisient, ϕD er dynamisk friksjon og ϕR er rullende friksjon.

RF med rigid body - Kartlagt terreng – Hjelle				
Bakketype	Koeffisienter			
	Rn (σ) [-]	Rt (σ) [-]	ϕD [-]	ϕR [-]
Hard Bedrock	0,53 (0,04)	0,99 (0,04)	0,50	0,15
Bedrock outcrops	0,35 (0,04)	0,85 (0,04)	0,50	0,15
Talus cover	0,32 (0,04)	0,80 (0,04)	0,50	0,30
Soil	0,30 (0,04)	0,81 (0,04)	0,56	0,59
Asphalt	0,44 (0,04)	0,71 (0,04)	0,56	0,42
Water	0	0	1	1

Tabell 18: RocFall, lump mass, terrengparametere basert på kartlagt terreng i Barstadvika. Rn er normal restitusjonskoeffisient, Rt er tangentiell restitusjonskoeffisient. Standardavviket (σ) til normalfordelingen er oppgitt i parentes

RF med lump ass - Kartlagt terreng - Barstadvika			
Bakketype	Rn (σ) [-]	Rt (σ) [-]	Friksjonsvinkel
Bedrock outcrops	0,35 (0,04)	0,85 (0,04)	Calculate from Rt
Talus cover	0,32 (0,04)	0,80 (0,04)	Calculate from Rt
Asphalt	0,44 (0,04)	0,71 (0,04)	Calculate from Rt

Tabell 19: RocFall, lump mass, terrengparametere basert på kartlagt terreng i Hjelle.. R_n er normal restitusjonskoeffisient, R_t er tangentiell restitusjonskoeffisient. Standardavviket (σ) til normalfordelingen er oppgitt i parentes

RF med lump mass - Kartlagt terreng - Hjelle			
Bakke type	R_n (σ) [-]	R_t (σ) [-]	Friksjonsvinkel
Hard bedrock	0,53 (0,04)	0,99 (0,04)	Calculate from R_t
Bedrock outcrops	0,35 (0,04)	0,85 (0,04)	Calculate from R_t
Talus cover	0,32 (0,04)	0,80 (0,04)	Calculate from R_t
Soil	0,30 (0,04)	0,81 (0,04)	Calculate from R_t
Asphalt	0,44 (0,04)	0,71 (0,04)	Calculate from R_t
Water	0	0	Calculate from R_t

3.3.5 Sensitivitetsanalyse simuleringsinnstillinger

En sensitivitetsanalyse sier noe om hvor sensitiv og robust en modell er for ulike justeringer av inngangsparametere. Inngangsparametere som er justert i denne studien er blokkvolum, blokkform og bakke type. I tillegg er det gjort simuleringer med RAS i RF3D og lump mass i RF. Simuleringsresultater som er vurdert er spranghøyde og total kinetisk energi. Disse parameterne er valgt fordi disse brukes til dimensjonering av steinspranggjerdet.

Simuleringsresultatet kan fremstilles i flere statistiske former i modellene, og i denne studien er de gjennomsnittlige verdiene brukt for å vurdere modellene. Det medfører at dersom det kjøres én simulering med 1000 utløste blokker i RR, vil hver rastercelle representere den gjennomsnittlige verdien av for eksempel spranghøyde for de passerte blokkene i den aktuelle rastercellen. Gjennomsnittlige verdier er valgt fordi alle de utvalgte modellene har denne statistiske fremstillingen av simuleringsresultatet. Dataene er deretter behandlet og fremstilt i grafer for hver av de utvalgte inngangsparameterene.

I sensitivitetsanalysen er utvalgte inngangsparametere variert, og simulering 1 er brukt som referanseverdi da denne baseres på beste vurdering og kartlagt terreng. Tabell 20 viser en oversikt over simuleringene som er gjort i sensitivitetsanalysen, for begge studieområdene, og beskriver hvilke inngangsparametere som er endret for hver simulering. I simulering 2 og 3 er blokkvolum justert, i simulering 4 og 5 er blokkform justert og i simulering 6 og 7 er bakke type justert, i tillegg er det gjennomført en simulering med RAS i RF3D og en simulering med lump mass i RF. Siden modellene skal sammenlignes er det valgt tilsvarende inngangsparametere for de ulike modellene, men hvor dette ikke lot seg gjøre er det valgt ut en tilnærmet lik parameter. For terrengparametere hvor det står "KT" er simuleringsinnstillinger for hver av modellene fra kartlagt terreng brukt (se Tabell 12 -

Tabell 19 for innstillinger av kartlagt terreng). Der det står ekstra hard (EH) eller medium hard (MH) er dette bakketyperne som er valgt i hele beregningsområdet. For RR tilsvare dette hhv. bakketyperne ekstra hard og medium hard, for RF3D hhv. bakketype 6 (berggrunn) og bakketype 3 (Ur med blokkdiameter < 10 cm), og for RF tilsvare dette hhv. bakketype "hard bedrock" og "talus cover". For RR er blokkformen "equant1.5" brukt i simulering 5, og tilsvare en ellipseformet blokk.

Tabell 20: Simuleringsinnstillinger brukt i sensitivitetsanalysen for modellverktøyene Ramms rockfall (RR), RocFall2 (RF) og Rockyfor3d (RF3D) i studieområdene Hjelle og Barstadvika . KT er kartlagt terreng fra felt. I simulering 8 er det kjørt med rapid automatic simulation (RAS) i RF3D og lump mass i RF.

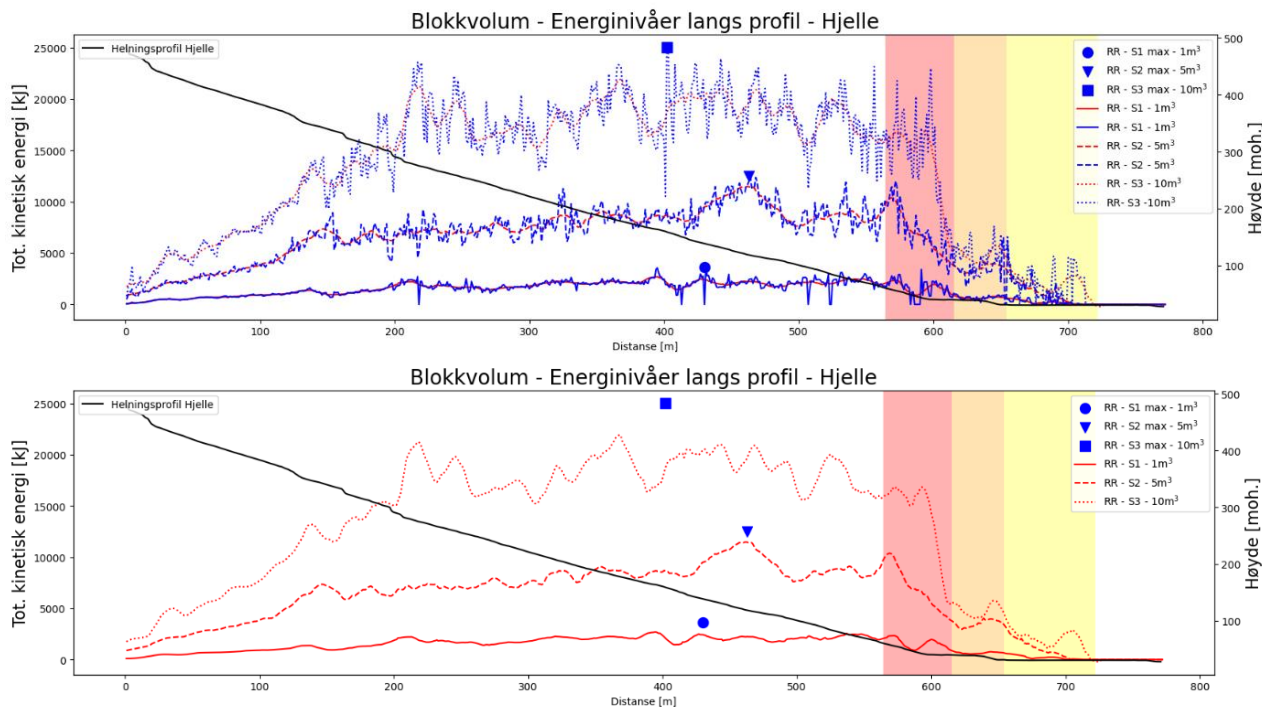
Sensitivitetsanalyse - Simuleringsinnstillinger				
Simulering	Analysemetode	Blokkvolum	Blokkform	Terreng
S1	Rigid body	1	Rektangel (R)	KT
S2	Rigid body	5	Rektangel (R)	KT
S3	Rigid body	10	Rektangel (R)	KT
S4	Rigid body	1	Sfære (S)	KT
S5	Rigid body	1	Ellipse (E)	KT
S6	Rigid body	1	Rektangel (R)	Ekstra hard (EH)
S7	Rigid body	1	Rektangel (R)	Medium hard (MH)
S8	RAS/lump mass	1	Rektangel (R)	KT

3.4 Databehandling av simuleringsresultat

For hver simulering er data fra simuleringsresultatet (gjennomsnittlig spranghøyde og gjennomsnittlig tot. kinetisk energi) hentet ut for hver meter langs utvalgte profil. For RR og RF3D er dette gjort i ArcGIS Pro, mens for RF gjøres dette direkte i RFs programvare. Rådataene i RF3D og RR har høy variasjon og er derfor vanskelig å sammenligne visuelt. For å bedre den visuelle sammenligningen mellom modellene er det gjort filtrering av dataene fra RR og RF3D. Rådataene er filtrert med et Savitzky-Golay filter, med vindu på 30 og 3. ordens polynom. Savitzky-Golay filter er et lavpassfilter for datautjevning basert på lokal minste-kvadraters-polynomtilnærming (Schafer, 2011). Dette innebærer å tilpasse et polynom til et sett med inngangsdata, og deretter evaluere det resulterende polynomet på et enkelt punkt innenfor et gitt tilnæringsintervall/vindu.

Et eksempel på prosessert data er vist under i Figur 25. I tillegg er maksverdien av gjennomsnittlig høyde/energi for hver simulering markert i grafen ved bruk av symboler for å tydeliggjøre forskjell mellom trend og maksverdi. Legenden beskriver hver simulering som er

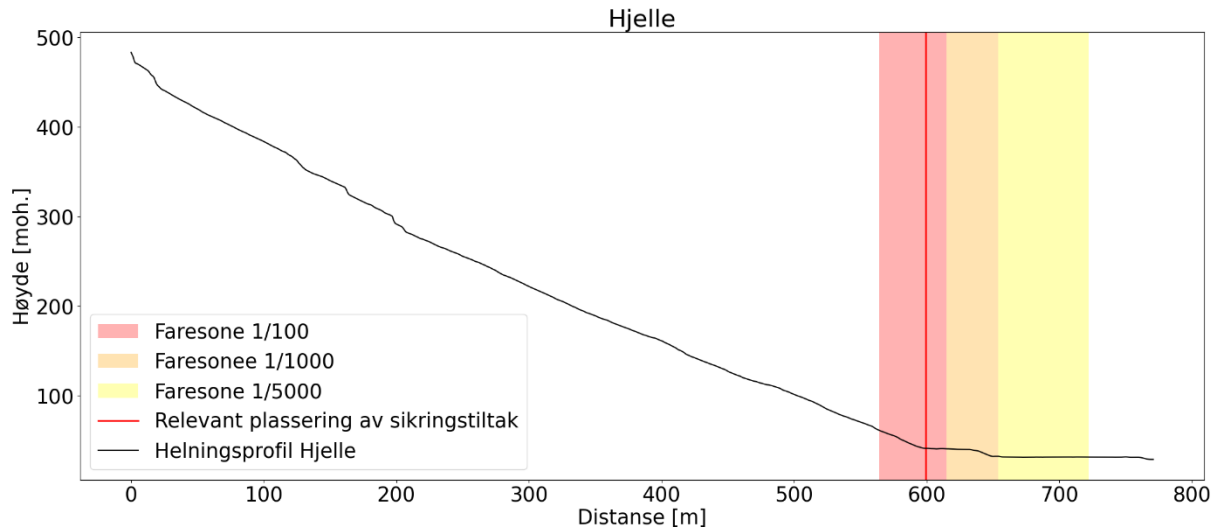
representert i grafen; først angis modell som er brukt i simuleringen (RR, RF3D eller RF), deretter hvilken simulering det er (S1, S2, S3, osv) og til slutt egenskapen for parameteren som justeres i sensitivitetsanalysen, som i dette eksempelet er blokkvolum (1 m^3 , 5 m^3 , og 10 m^3).



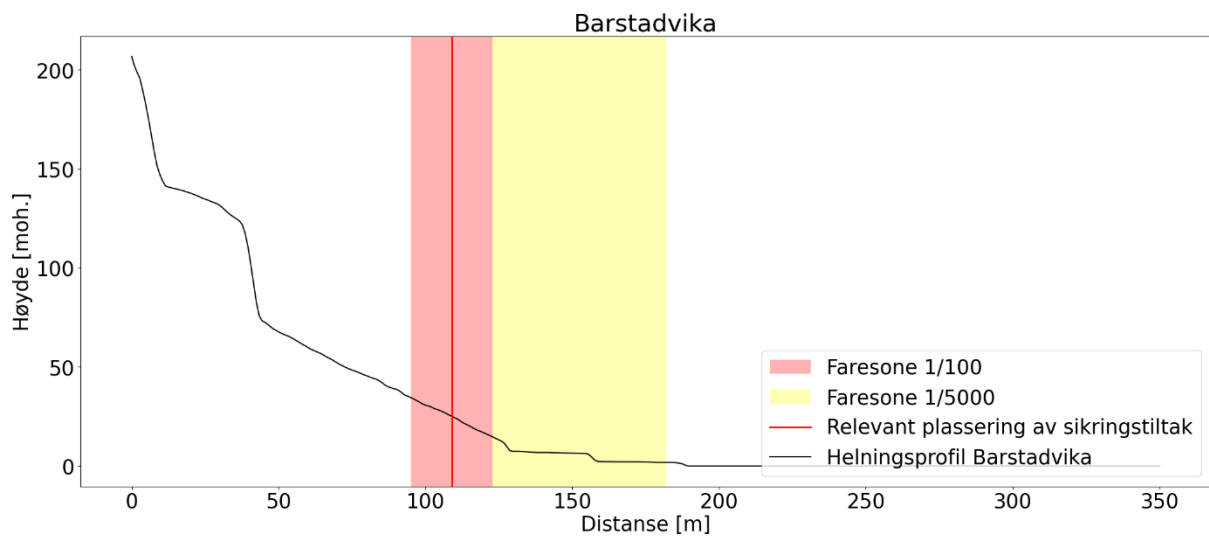
Figur 25: Eksempel på ubehandlet (blå kurver) og behandlet (rød kurver) data av simuleringresultat for Ramms Rockfall i Hjelle.. Legende: RAMMS Rockfall (RR), simulering 1-3 (S1-S3), blokkvolum (1 m^3 , 5 m^3 og 10 m^3), blå symboler (gjennomsnittlig maks verdier). Bakgrunnsfarge (rød, oransje og gul) representerer faresoner for skred i Hjelle.

3.5 Kvantitativ fremstilling av resultat fra ett gitt punkt langs profil

Avslutningsvis er simuleringresultatene (ubehandlet data av gjennomsnittlig spranghøyde og gjennomsnittlig total kinetisk energi) kvantitativt fremstilt i tabellform. Data som er representert er fra et gitt punkt langs profil hvor plassering av sikringstiltak er relevant. Punktet er plassert i faresone 1/100 for steinsprang som vist under i Figur 26 for Hjelle og Figur 27 for Barstadvika. Å representere simuleringresultat for et gitt punkt hvor det er aktuelt å etablere sikringstiltak bidrar til økt kvantitativ forståelse for hvor stort utslag valg av modellverktøy og justering av inngangsverdier kan gi for dimensjonering av sikringstiltak.



Figur 26: Utvalgt punkt (rød linje) langs profil for kvantitativ fremstilling av resultat. Punktet representerer relevant plassering av sikringstiltak i Hjelle. Bakgrunnsfarge rød, oransje og gul viser faresoner for skred .



Figur 27: Utvalgt punkt (rød linje) langs profil for kvantitativ fremstilling av resultat. Punktet representerer relevant plassering av sikringstiltak i Barstadvika. Bakgrunnsfarge rød og gul viser faresoner for skred .

4 Resultater

Det er gjennomført en sensitivitetsanalyse av modellverktøyene RAMMS Rockfall (RR), Rockyfor3D (RF3D) og RocFall2 (RF). Inngangsparametere som er justert er blokkvolum, blokkform og bakketype, i tillegg er det gjort simuleringer med analysemodellene rapid automatic simulation (RAS) for RF3D og lump mass for RF. Resultat av simuleringene er representert i delkapitlene under.

For å sammenligne simuleringsresultatene (gjennomsnittlig total kinetisk energi og gjennomsnittlig spranghøyder) mellom de ulike modellverktøyene er det valgt en grafisk fremstilling, per justerte parameter, langs de definerte helningsprofilene fra Hjelle og Barstadvika. For hver justerte parameter er det gjort en sammenligning av resultatene både mellom modellene og innad for hver modell. Det er vanskelig å kvantifisere hvor mye utslag de ulike parameterjusteringene gir, da dette varierer langs profilet og det er stor variasjon i resultatene. Det er derfor i hovedsak kommentert relative forskjeller mellom modellene og simuleringer innad for hver modell. Simulering 1 (*1 m³, rektangulær blokk, Kartlagt Terreng*) er brukt i alle sammenligninger og justerte parametere er endret ut i fra simuleringsinnstillingen til simulering 1. Til slutt er resultatverdier for et representativt punkt langs helningsprofilet representert. Ved dimensjonering av steinspranggjerdje er faresoner ofte brukt som dimensjonerende sikringsmål, og det er derfor interessant å se hvor stor variasjon de ulike modellene og inngangsparameterne gir i dette området.

Grafisk fremstilling av rådata for hver enkelt simulering er vist i vedlegg A og B for henholdsvis energi og spranghøyde i Hjelle, og Vedlegg C og D for henholdsvis energi og spranghøyde i Barstadvika.

4.1 Variasjon av blokkvolum

Modellene er kjørt med tre ulike inngangsverdier for blokkvolum; 1, 5 og 10 m³. Effekten av ulik blokkvolum for kinetisk energi og spranghøyde er så studert (langs helningsprofilene).

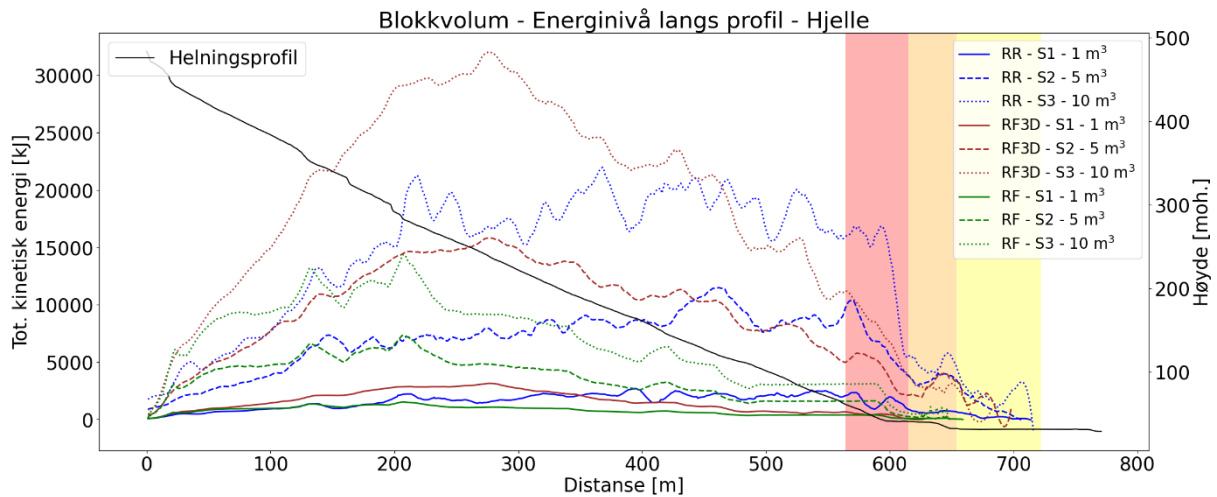
4.1.1 Resultat for kinetisk energi

Resultat for de ulike blokkvolumene for RF, RF3D og RR er gitt i Figur 28 og Figur 29. Resultatene viser en tydelig trend på at energinivået øker ved økt blokkvolum for alle modellene. Effekten av økt blokkvolum varierer avhengig av modell og studieområde. Jo større blokkvolumet er, jo større spredning har resultatene mellom modellene, men det er mindre spredning i resultatene for simuleringer gjort i Barstadvika. Totalt sett skiller RF seg ut ved å gi lavest energinivå langs profilene. For de ulike modellene er følgende observert:

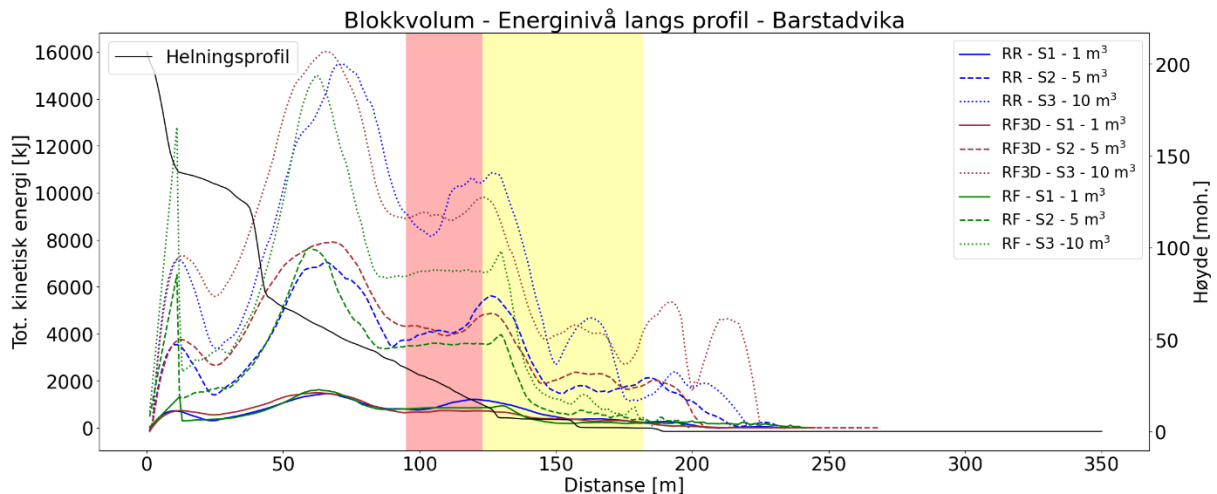
- RF: Har lavest energinivå for begge testområder, for alle tre blokkstørrelser, og er den modellen som er minst påvirket av variasjon i blokkvolum. Dette kommer tydeligst

frem i Hjelle (Figur 28). I Barstadvika (Figur 29) har RF relativt høye energitopper (ved distanse rundt 50 m), men sett bort fra disse er det tydelig at energinivåene langs profilet er lavere for RF enn de andre modellene.

- RF3D og RR: Det er tydelig at begge modellene responderer vesentlig på økt blokkvolum, og resultatet viser en markant energiøkning ved økt blokkstørrelse. For Hjelle viser RF3D større økning av energi enn RR tidlig i helningsprofilen, mens RR viser størst energinivå i faresoner. For Barstadvika er energinivåer relativt like mellom begge modeller.



Figur 28: Resultater av gjennomsnittlig total kinetisk energi i Hjelle hvor blokkvolum er justert for de tre utvalgte modellverktøyene. Legende: RAMMS Rockfall (RR), Rockyfor3D (RF3D), RocFall2 (RF), simulering 1-3 (S1-S3), blokkvolum (1 m^3 , 5 m^3 og 10 m^3). Hver farge representerer modellverktøyet som er brukt hvor RR er blå, RF3D er rød og RF er grønn. Svart heltrukket linje representerer helningsprofilen hvor dataen er hentet ut fra. Bakgrunnsfarge (rød, oransje og gul) representerer faresoner for skred i Hjelle.

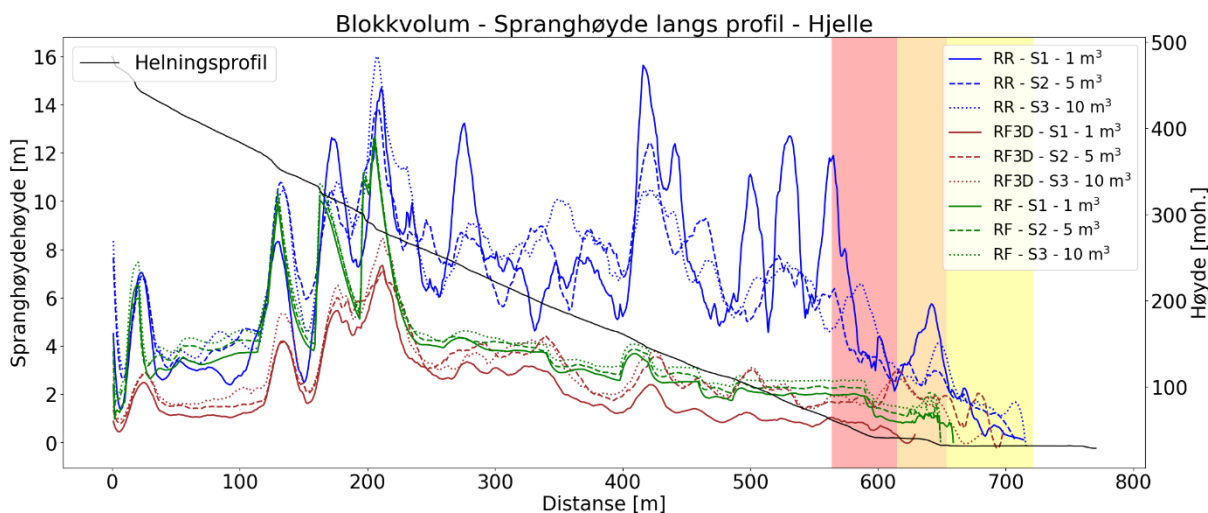


Figur 29: Resultater av gjennomsnittlig total kinetisk energi i Barstadvika hvor blokkvolum er justert for de tre utvalgte modellverktøyene. Legende: RAMMS Rockfall (RR), Rockyfor3D (RF3D), RocFall2 (RF), simulering 1-3 (S1-S3), blokkvolum (1 m^3 , 5 m^3 og 10 m^3). Hver farge representerer modellverktøyet som er brukt hvor RR er blå, RF3D er rød og RF er grønn. Svart heltrukket linje representerer helningsprofilen hvor dataen er hentet ut fra. Bakgrunnsfarge (rød, oransje og gul) representerer faresoner for skred i Barstadvika.

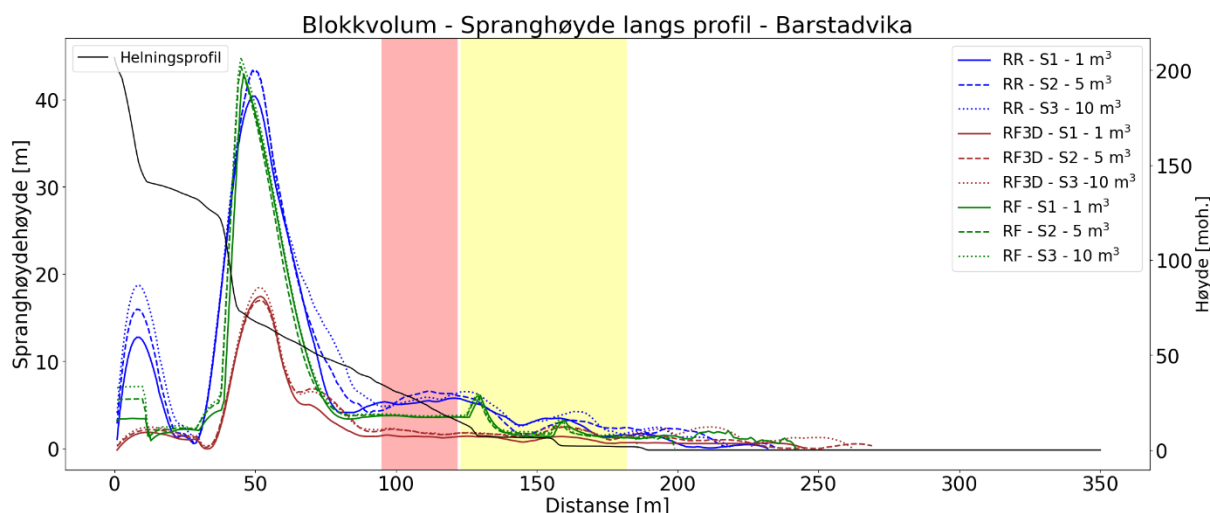
4.1.2 Resultat for spranghøyder

Resultat for ulike spranghøyder for RF, RF3D og RR er gitt i Figur 30 og Figur 31. RF3D gir lavest spranghøyder langs profilene, med unntak av foten til fjellssidene hvor terrenget flater ut (etter distanse 650 m for Hjelle og 150 m for Barstadvika). Her jevner resultatene mellom modellene seg ut og systematiske forskjeller mellom modellene er vanskelig å identifisere. RR er den modellen som gir høyest spranghøyder. Dette kommer tydeligst frem i Hjelle (Figur 30), men man ser også tendensen til dette i Barstadvika (Figur 31). Det er generelt sett mindre spredning i resultatene for simuleringer gjort i Barstadvika enn i Hjelle. For de ulike modellene er følgende observert:

- RF: Er lite påvirket av blokkvolumjusteringen, hvor justering av blokkvolum gir ingen til liten grad utslag i spranghøyder langs profil.
- RF3D: Justering av blokkvolum gir noe utslag i spranghøyder, hvor man ser tendenser til at blokkvolum på 1 m^3 gir mindre spranghøyder enn blokkvolum på 5 og 10 m^3 . Det er derimot ikke tydelige systematiske forskjeller mellom spranghøyder for blokkvolum på 5 og 10 m^3 .
- RR: Produserer varierende resultat av spranghøyder. Økt blokkstørrelse gir store utslag for spranghøyder i simuleringene gjort i Hjelle, men i Barstadvika er dette ikke tilfelle. I Hjelle er spranghøydene størst og varierer mest ved blokkvolum på 1 m^3 .



Figur 30: Resultater av gjennomsnittlig spranghøyder i Hjelle hvor blokkvolum er justert for de tre utvalgte modellverktøyene. Legende: RAMMS Rockfall (RR), Rockyfor3D (RF3D), RocFall2 (RF), simulering 1-3 (S1-S3), blokkvolum (1 m^3 , 5 m^3 og 10 m^3). Hver farge representerer modellverktøyet som er brukt hvor RR er blå, RF3D er rød og RF er grønn. Svart heltrukket linje representerer helningsprofilen hvor dataen er hentet ut fra. Bakgrunnsfarge (rød, oransje og gul) representerer faresoner for skred i Hjelle.



Figur 31: Resultater av gjennomsnittlig spranghøyde i Barstadvika hvor blokkvolum er justert for de tre utvalgte modellverktøyene. Legende: RAMMS Rockfall (RR), Rockyfor3D (RF3D), RocFall2 (RF), simulering 1-3 (S1-S3), blokkvolum (1 m^3 , 5 m^3 og 10 m^3). Hver farge representerer modellverktøyet som er brukt hvor RR er blå, RF3D er rød og RF er grønn. Svart heltrukket linje representerer helningsprofilen hvor dataen er hentet ut fra. Bakgrunnsfarge (rød og gul) representerer faresoner for skred i Barstadvika.

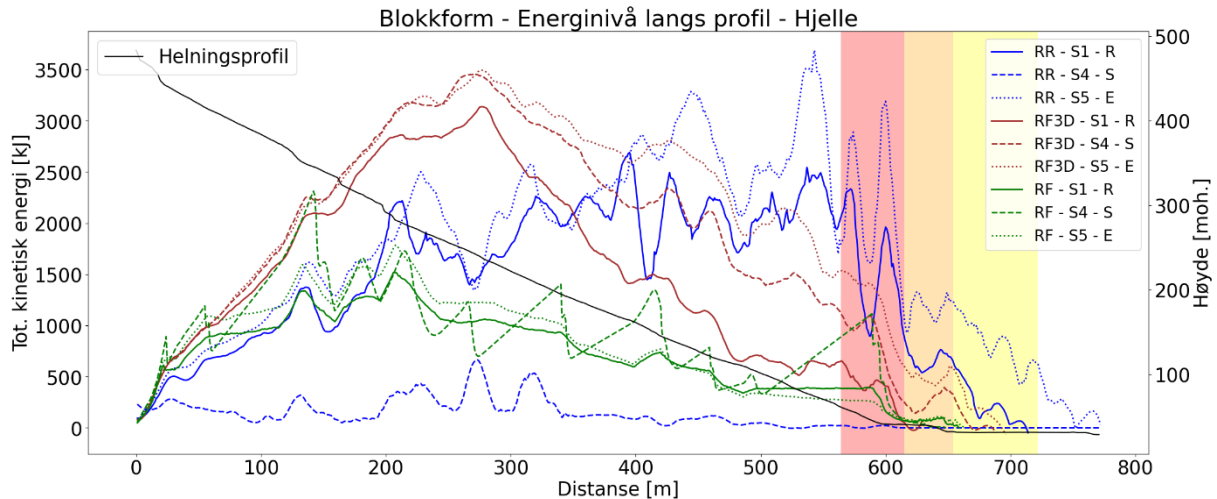
4.2 Variasjon av blokkform

Modellene er kjørt med tre ulike inngangsverdier for blokkform; i) Rektangel (R), ii) Sfære (S) og iii) Ellipse (E). Effekten av ulike blokkformer for kinetisk energi og spranghøyde langs helningsprofilene er så studert.

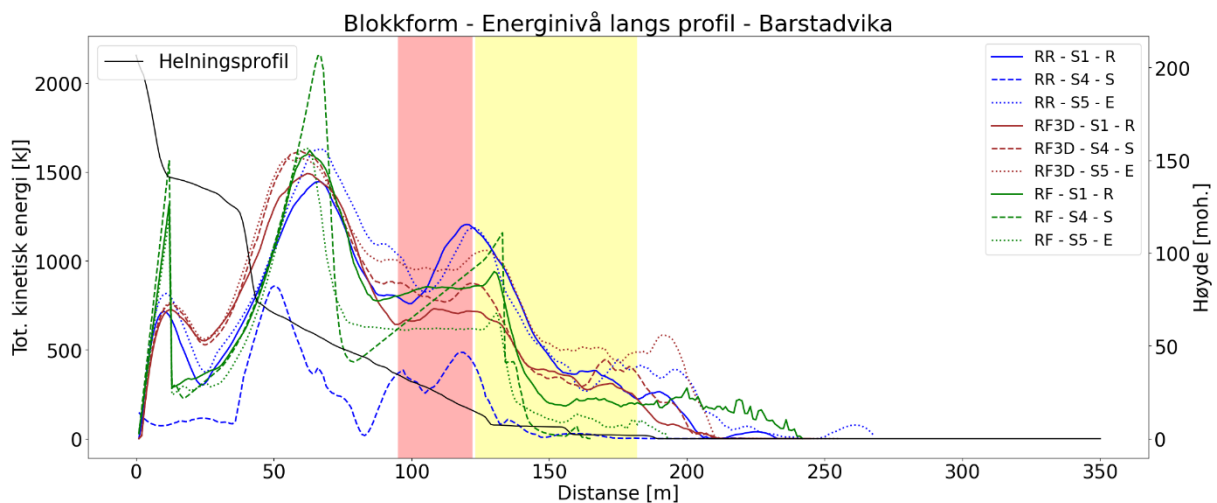
4.2.1 Resultat for kinetisk energi

En sammenligning av total kinetisk energi for ulike blokkformer er gitt i Figur 32 og Figur 33. Resultatene tyder på at valg av blokkform påvirker energinivåene i stor grad for alle modellene, men det er stor variasjon på hvilke utslag de ulike blokkformene gir blant modellene. For de ulike modellene er følgende observert:

- RF: Sfæreformet blokk gir høyest, men også størst variasjon av, energinivå langs profilene. Ellipseformet blokk og rektangulær blokk har energinivåer med mindre variasjon hvor energinivåene samsvarer mer med hverandre.
- RF3D: For begge områdene ser man tydelig trend på at ellipseformet blokk har høyest energinivå langs profil, sfæreformet blokk har nest høyest og rektangulær blokk har lavest. Disse forskjellene kommer tydeligst frem fra rundt starten av ur og videre langs profil (Distanse etter 300 m for Hjelle og 50 m for Barstadvika) for begge områdene.
- RR: Sfærisk blokkform (S4) skiller seg markant ut med ekstremt lave energinivåer sammenlignet med alle øvrige simuleringer for alle modellene.



Figur 32: Resultater av gjennomsnittlig total kinetisk energi i Hjelle hvor blokkform er justert for de tre utvalgte modellverktøyene. Legende: RAMMS Rockfall (RR), Rockyfor3D (RF3D), RocFall2 (RF), simulering 1, 4 og 5 (S1, S4 og S5), blokkform (R = rektangel, S = sfære, E = ellipse). Hver farge representerer modellverktøyet som er brukt hvor RR er blå, RF3D er rød og RF er grønn. Svart heltrukken linje representerer helningsprofilen hvor dataen er hentet ut fra. Bakgrunnsfarge (rød, oransje og gul) representerer faresoner for skred i Hjelle.

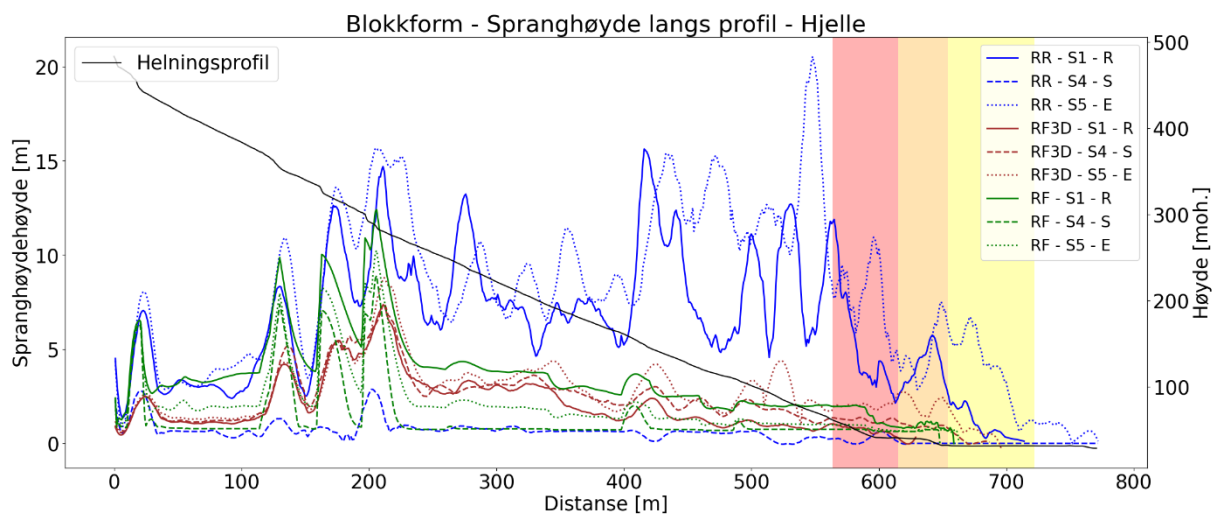


Figur 33: Resultater av gjennomsnittlig total kinetisk energi i Barstadvika hvor blokkform er justert for de tre utvalgte modellverktøyene. Legende: RAMMS Rockfall (RR), Rockyfor3D (RF3D), RocFall2 (RF), simulering 1, 4 og 5 (S1, S4 og S5), blokkform (R = rektangel, S = sfære, E = ellipse). Hver farge representerer modellverktøyet som er brukt hvor RR er blå, RF3D er rød og RF er grønn. Svart heltrukken linje representerer helningsprofilen hvor dataen er hentet ut fra. Bakgrunnsfarge (rød og gul) representerer faresoner for skred i Barstadvika.

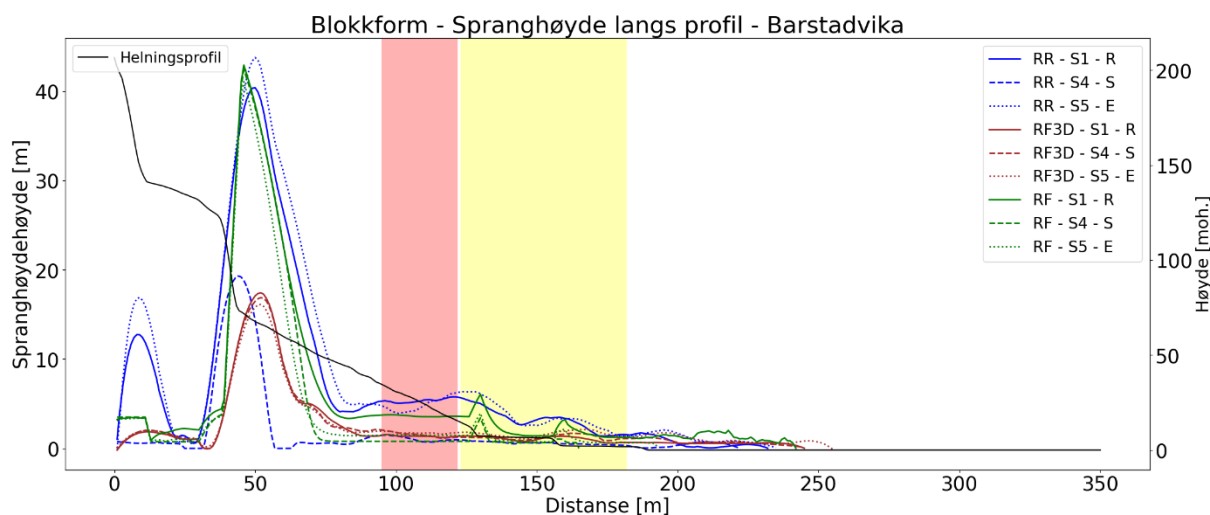
4.2.2 Resultat for spranghøyder

En sammenligning av spranghøyder for ulike blokkformer er gitt i Figur 34 og Figur 35. Blant modellene har RR, sett bort i fra simulering med sfæreformet blokk, størst spranghøyder langs begge profilene. RF og RF3D har spranghøyder som samsvarer mer med hverandre, men RF har derimot større svingninger og derav større maks spranghøyde enn RF3D. Sett bort i fra dette er det ingen tydelig systematisk forskjell på spranghøydene mellom RF og RF3D. For de ulike modellene er følgende observert:

- RF: Det er en tydelig trend at rektangulær blokkform gir høyest spranghøyder blant de tre blokkformene. Resultatene indikerer også at sfæreformet blokk i RF gir lavest spranghøyder blant de tre blokkformene. Dette er tydelig for simuleringer i Hjelle (Figur 34), men mindre fremtredende for simuleringer i Barstadvika (Figur 35)
- RF3D: Det er ingen systematisk forskjell ved justert blokkform i RF3D, og justering av blokkform gir lite utslag i spranghøyder.
- RR: Sfærisk blokkform skiller seg markant ut med ekstremt lave spranghøyder sammenlignet med alle simuleringer for alle modellene. Utover dette er det ingen tydelige systematiske forskjeller av spranghøyder mellom blokkformene.



Figur 34: Resultater av gjennomsnittlig spranghøyder i Hjelle hvor blokkform er justert for de tre utvalgte modellverktøyene. Legende: RAMMS Rockfall (RR), Rockyfor3D (RF3D), RocFall2 (RF), simulering 1, 4 og 5 (S1, S4 og S5), blokkform (R = rektangel, S = sfære, E = ellipse). Hver farge representerer modellverktøyet som er brukt hvor RR er blå, RF3D er rød og RF er grønn. Svart heltrukket linje representerer helningsprofilen hvor dataen er hentet ut fra. Bakgrunnsfarge (rød, oransje og gul) representerer faresoner for skred i Hjelle.



Figur 35: Resultater av gjennomsnittlig spranghøyder i Barstadvika hvor blokkform er justert for de tre utvalgte modellverktøyene. Legende: RAMMS Rockfall (RR), Rockyfor3D (RF3D), RocFall2 (RF), simulering 1, 4 og 5 (S1, S4 og S5), blokkform (R = rektangel, S = sfære, E = ellipse). Hver farge representerer modellverktøyet som er brukt hvor RR er blå, RF3D er rød og RF er grønn. Svart heltrukket linje representerer helningsprofilen hvor dataen er hentet ut fra. Bakgrunnsfarge (rød og gul) representerer faresoner for skred i Barstadvika.

4.3 Variasjon av bakketype

Modellene er kjørt med tre ulike inngangsverdier for bakketype; i) Kartlagt terreng (KT), ii) Ekstra hard (EH) og iii) Medium hard (MH). Effekten av ulike bakketype for kinetisk energi og spranghøyde er studert langs de to helningsprofilene. Resultatene tyder på at valg av bakketype påvirker energinivåene og spranghøydene i stor grad.

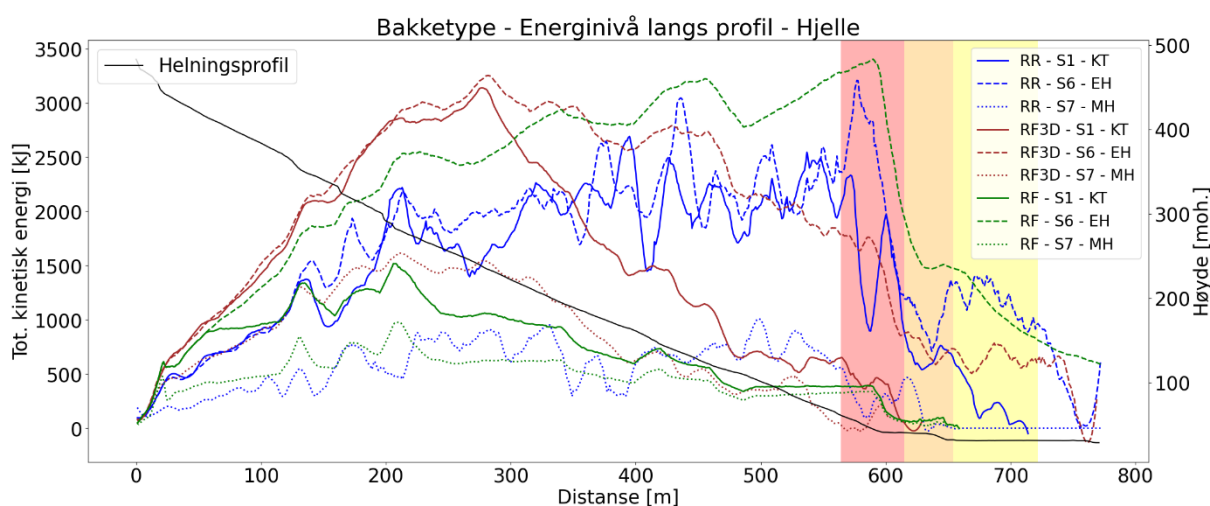
4.3.1 Resultat for kinetisk energi

En sammenligning av total kinetisk energi for ulike bakketyper for RF, RF3D og RR er gitt i Figur 36 og Figur 37. Resultatene tyder på at valg av bakketype påvirker energinivåene stor grad. For RF3D og RR gir mykere underlag lavere energinivåer enn hardere underlag, dette gjelder også for RF i simuleringer gjort i Hjelle, men ikke i Barstadvika. For de ulike modellene er følgende observert:

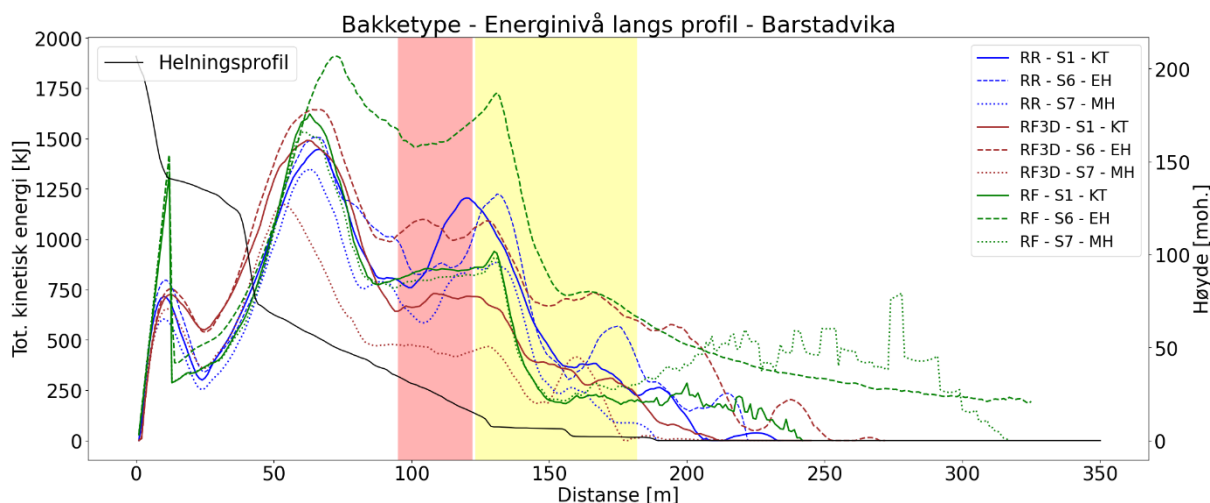
- RF: Det er en tydelig systematisk forskjell mellom simuleringene i Hjelle hvor medium hard terreng gir lavest energinivåer, kartlagt terreng gir nest høyest og ekstra hard gir høyest. RF responderer sterkt ved justering til ekstra hardt terreng, hvor forskjell på energinivå mellom kartlagt terreng og ekstra hardt terreng er større enn forskjellen mellom kartlagt terreng og medium hardt terreng. I Barstadvika (Figur 37) skiller medium hardt terreng seg ut ved at energinivåene øker unormalt mye ved foten av fjellsiden og videre i flatt terreng (ved ca 200m til 320m).
- RF3D: Her også ser man en tydelig forskjell mellom simuleringene, både i Hjelle og Barstadvika, at medium hardt terreng gir lavest energinivåer, kartlagt terreng gir

nest høyest og medium hardt terreng gir høyest. Det er derimot ingen merkbare forskjeller mellom simuleringene hvor enten ekstra hardt eller medium hardt skiller seg ut med større differanse, fra kartlagt terreng, enn den andre.

- RR: Responderer sterkt på justering fra kartlagt terreng til medium hardt terreng, hvor simulering med medium hardt gir lavest energinivåer. Ved justering fra kartlagt terreng til ekstra hardt terreng ser man en økning av energinivåer, men dette er derimot mindre tydelig da energinivåene mellom kartlagt terreng og ekstra hardt terreng overlapper og samsvarer med hverandre.



Figur 36: Resultater av gjennomsnittlig total kinetisk energi i Hjelle hvor bakke type er justert for de tre utvalgte modellverktøyene. Legende: RAMMS Rockfall (RR), Rockyfor3D (RF3D), RocFall2 (RF), simulering 1, 6 og 7 (S1, S6 og S7), bakke type (KT = kartlagt terreng, EH = ekstra hardt, MH = medium hardt). Hver farge representerer modellverktøyet som er brukt hvor RR er blå, RF3D er rød og RF er grønn. Svart heltrukket linje representerer helningsprofilen hvor dataen er hentet ut fra. Bakgrunnsfarge (rød, oransje og gul) representerer faresoner for skred i Hjelle.

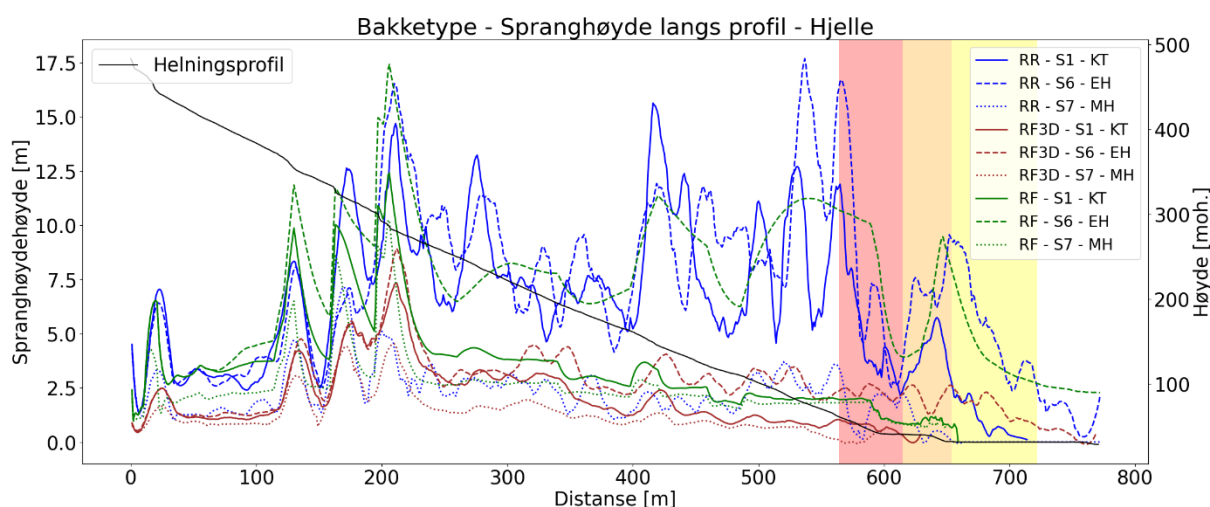


Figur 37: Resultater av gjennomsnittlig total kinetisk energi i Barstadvika hvor bakke type er justert for de tre utvalgte modellverktøyene. Legende: RAMMS Rockfall (RR), Rockyfor3D (RF3D), RocFall2 (RF), simulering 1, 6 og 7 (S1, S6 og S7), bakke type (KT = kartlagt terreng, EH = ekstra hardt, MH = medium hardt). Hver farge representerer modellverktøyet som er brukt hvor RR er blå, RF3D er rød og RF er grønn. Svart heltrukket linje representerer helningsprofilen hvor dataen er hentet ut fra. Bakgrunnsfarge (rød og gul) representerer faresoner for skred i Barstadvika.

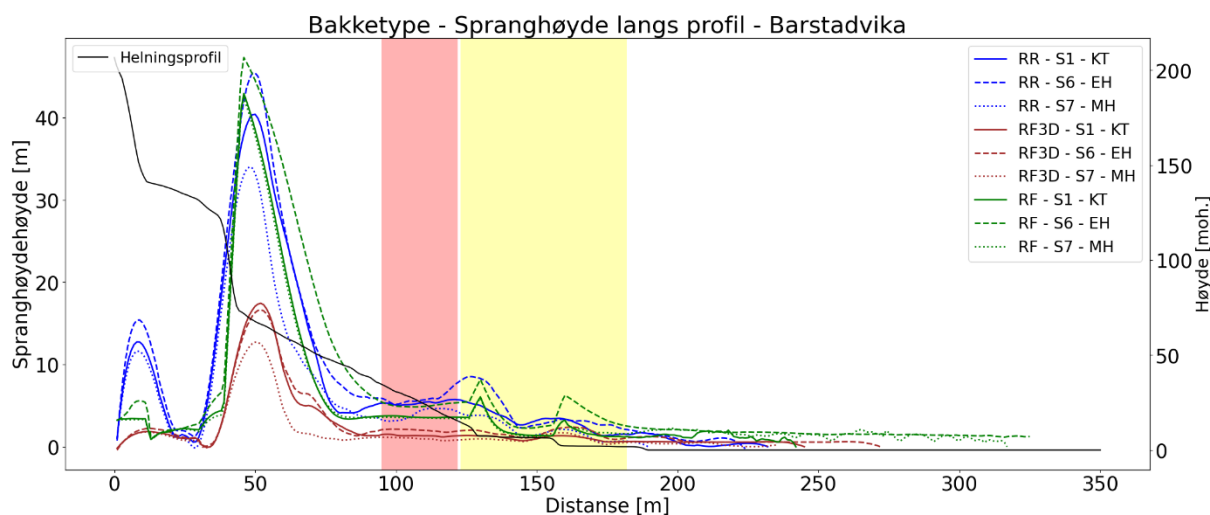
4.3.2 Resultat for spranghøyder

En sammenligning av spranghøyder for ulike bakketyper (Kartlagt terreng (KT), Ekstra hardt (EH) og Medium hardt (MH) for RF, RF3D og RR er gitt i Figur 38 og Figur 39. Resultatene viser at mykere underlag gir lavere spranghøyder enn hardere underlag for alle modellene, men utslag av justeringen avhenger av modell. RF3D er den modellen med minst spredning og lavest spranghøyder i resultatene. For de ulike modellene er følgende observert:

- RF: For begge områder responderer RF med tilnærmet like verdier for kartlagt terreng og medium hard, men har tydelig høyere verdier for ekstra hard.
- RF3D: For Hjelle responderer RF3D med høyere verdier for bakketyperne ekstra hard og lavere spranghøyder for medium hard sammenlignet med kartlagt terreng, mens i Barstadvika gir ekstra hard og kartlagt terreng tilnærmet like spranghøyder.
- RR: For Hjelle gir RR tilnærmet lik respons for kartlagt terreng og ekstra hard, men med noe variasjon mellom hvor energitopper oppstår langs profilet. Bakketype medium hard gir vesentlig lavere verdier sammenlignet med kartlagt terreng og ekstra hard. For Barstadvika er det en jevn spredning mellom simuleringene i starten av profilet, med lavest verdier for medium hard og høyest for ekstra hard, mens i faresoner er spranghøyder tilnærmet like.



Figur 38: Resultater av gjennomsnittlig spranghøyder i Hjelle hvor bakketype er justert for de tre utvalgte modellverktøyene. Legende: RAMMS Rockfall (RR), Rockyfor3D (RF3D), RocFall2 (RF), simulering 1, 6 og 7 (S1, S6 og S7), bakketype (KT = kartlagt terreng, EH = ekstra hard, MH = medium hard). Hver farge representerer modellverktøyet som er brukt hvor RR er blå, RF3D er rød og RF er grønn. Svart heltrukket linje representerer helningsprofilen hvor dataen er hentet ut fra. Bakgrunnsfarge (rød, oransje og gul) representerer faresoner for skred i Hjelle.



Figur 39: Resultater av gjennomsnittlig spranghøyder i Barstadvika hvor bakke type er justert for de tre utvalgte modellverktøyene. Legende: RAMMS Rockfall (RR), Rockyfor3D (RF3D), RocFall2 (RF), simulering 1, 6 og 7 (S1, S6 og S7), bakke type (KT = kartlagt terreng, EH = ekstra hard, MH = medium hard). Hver farge representerer modellverktøyet som er brukt hvor RR er blå, RF3D er rød og RF er grønn. Svart heltrukken linje representerer helningsprofilen hvor dataen er hentet ut fra. Bakgrunnsfarge (rød og gul) representerer faresoner for skred i Barstadvika.

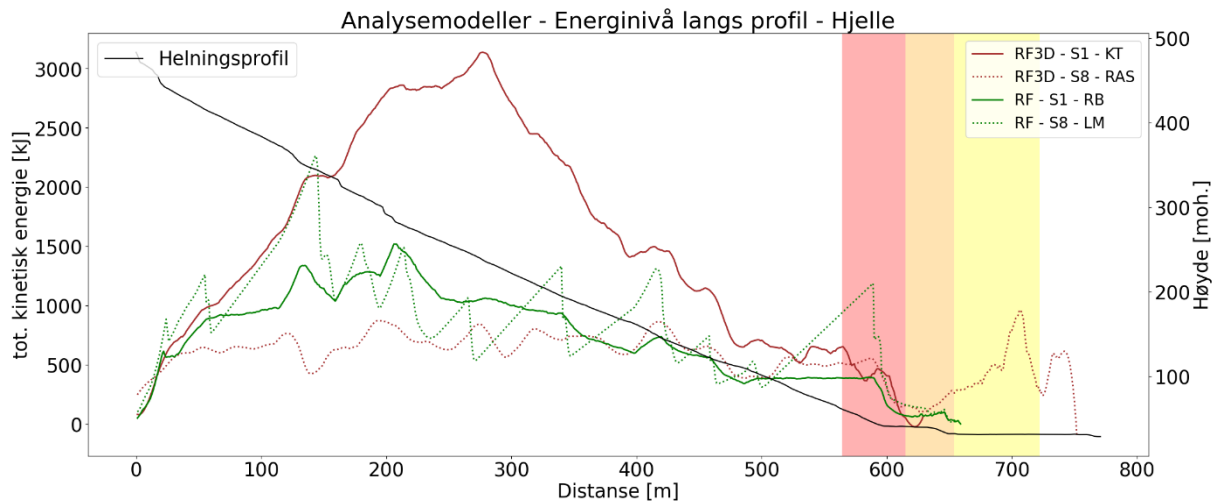
4.4 Analysemodeller

For RF er det gjort en sammenligning av rigid body (RB) og lump mass (LM). For RF3D er det gjort en sammenligning av manuell input av terrengparametere med kartlagt terreng (KT) og automatisk input av terrengparametere med rapid automatic simulation (RAS). Dette er ikke relevant for RR da modellen ikke tilbyr disse funksjonene.

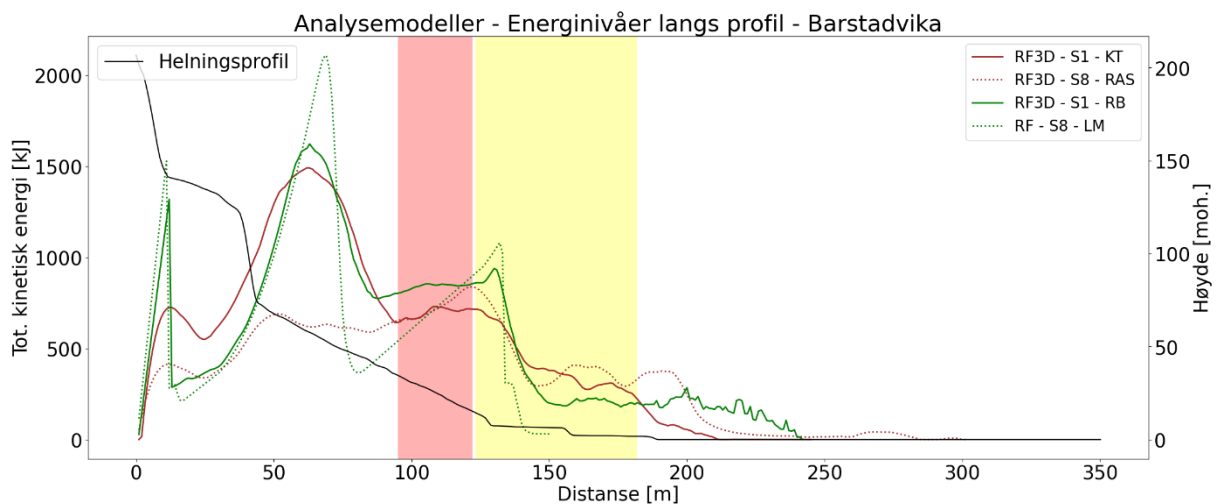
4.4.1 Resultat for kinetisk energi

En sammenligning av total kinetisk energi for ulike analysemodeller i RF og RF3D er gitt i Figur 40 og Figur 41. For de ulike modellene kan vi observere at:

- RF: Simuleringer med lump mass gir større variasjon av energinivåer langs profil enn simuleringer med rigid body. Lump mass gir de høyeste amplitudene.
- RF3D: Simuleringer med RAS gir langt lavere energinivåer enn simuleringer med kartlagt terreng. RAS-resultatet viser i tillegg en uventet økning av energinivå ved foten av fjellsiden og videre i flatt terreng, for begge områdene.



Figur 40: Resultater av gjennomsnittlig total kinetisk energi i Hjelle med ulike analysemodeller for RF3D og RF. Legende: Rockyfor3D (RF3D), RocFall2 (RF), simulering 1 og 8 (S1, S8), kartlagt terreng (KT), rapid automatic simulation (RAS), rigid body (RB), lump mass (LM). Hver farge representerer modellverktøyet som er brukt hvor RF3D er rød og RF er grønn. Svart heltrukken linje representerer helningsprofilen hvor dataen er hentet ut fra. Bakgrunnsfarge (rød, oransje og gul) representerer faresoner for skred i Hjelle.



Figur 41: Resultater av gjennomsnittlig total kinetisk energi i Barstadvika med ulike analysemodeller for RF3D og RF. Legende: Rockyfor3D (RF3D), RocFall2 (RF), simulering 1 og 8 (S1, S8), kartlagt terreng (KT), rapid automatic simulation (RAS), rigid body (RB), lump mass (LM). Hver farge representerer modellverktøyet som er brukt hvor RF3D er rød og RF er grønn. Svart heltrukken linje representerer helningsprofilen hvor dataen er hentet ut fra. Bakgrunnsfarge (rød og gul) representerer faresoner for skred i Barstadvika.

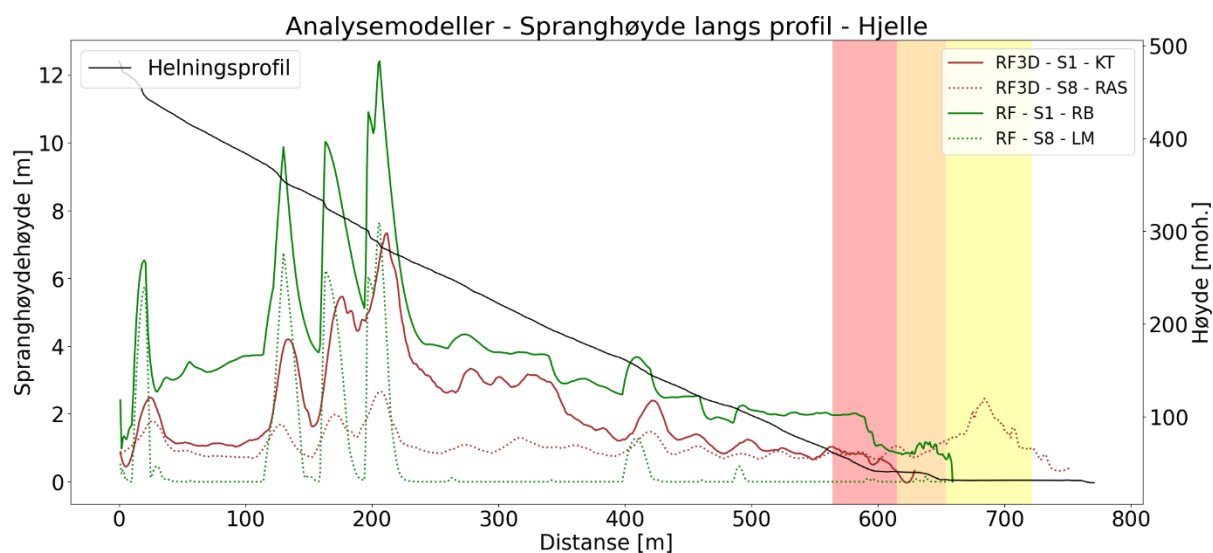
4.4.2 Resultat for spranghøyder

En sammenligning av spranghøyder for ulike analysemodeller i RF og RF3D er gitt i Figur 42 og Figur 43. For de ulike modellene er følgende observert:

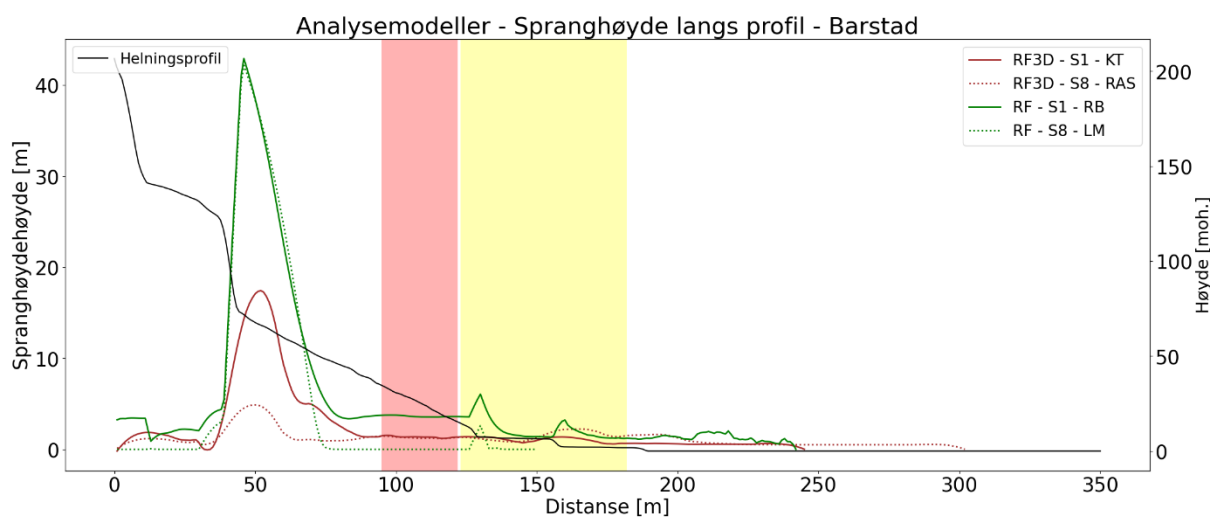
- RF: Lump mass gir lavere spranghøyder langs profil enn simuleringer med rigid body. Lump mass gir spranghøyder tilnærmet 0 m langs profil, unntatt ved tydelige bratte skrenter hvor spranghøyder på flere meter forekommer. Spranghøydeutviklingen langs profil for lump mass og rigid body samsvarer med hverandre. Det vil si at hvor det

oppstår størst spranghøyder med lump mass oppstår det også størst spranghøyder med rigid body.

- RF3D: RAS-resultatet viser en uventet økning av spranghøyder ved foten av fjellsiden og videre i flatt terreng, dette er tydeligst i Hjelle, men det er tilsvarende tendenser i Barstadvika. Utover dette gir simuleringer med RAS lavere spranghøyder enn simuleringer med kartlagt terreng.



Figur 42: Resultater av gjennomsnittlig spranghøyde i Hjelle hvor det er kjørt simuleringer med ulike analysemodeller for RF3D og RF. Legende: Rockyfor3D (RF3D), RocFall2 (RF), simulering 1 og 8 (S1, S8), kartlagt terreng (KT), rapid automatic simulation (RAS), rigid body (RB), lump mass (LM). Hver farge representerer modellverktøyet som er brukt hvor RF3D er rød og RF er grønn. Svart heltrukken linje representerer helningsprofilen hvor dataen er hentet ut fra. Bakgrunnsfarge (rød, oransje og gul) representerer faresonene for skred i Hjelle.



Figur 43: Resultater av gjennomsnittlig spranghøyde i Barstadvika hvor det er kjørt simuleringer med ulike analysemodeller for RF3D og RF. Legende: Rockyfor3D (RF3D), RocFall2 (RF), simulering 1 og 8 (S1, S8), kartlagt terreng (KT), rapid automatic simulation (RAS), rigid body (RB), lump mass (LM). Hver farge representerer modellverktøyet som er brukt hvor RF3D er rød og RF er grønn. Svart heltrukken linje representerer helningsprofilen hvor dataen er hentet ut fra. Bakgrunnsfarge (rød og gul) representerer faresonene for skred i Barstadvika.

4.5 Simuleringsresultat i et gitt punkt langs profil

Tabell 21 og Tabell 22 viser gjennomsnittlig spranghøyde og total kinetisk energi i et gitt punkt langs profil. Punktet representerer en relevant plassering av tiltak i faresone 1/100, det vil si faresone med årlig nominell sannsynlighet 1/100, for respektivt Hjelle og Barstadvika. Nøyaktig plassering av punkt er vist i kapittel 3.5, Figur 26 for Hjelle og Figur 27 for Barstadvika. Simulering 1 (1 m^3 , rektangulær blokk, Kartlagt Terreng) er brukt i alle sammenligninger og det er kun én parameter som er justert ift. inngangsverdiene til simulering 1. Generelt sett er det stor spredning i resultatene, men spredningen er større i Hjelle enn i Barstadvika. For de ulike modellene er følgende observert:

- RF: Produserer lavere energinivåer ved justert blokkvolum enn de andre modellene. RF reagerer sterkt på justert bakketype fra kartlagt terreng (S1) til medium hard (S6).
- RF3D: Produserer generelt lavere spranghøyder enn de andre modellene og er den modellen med minst variasjon i spranghøyder.
- RR: Produserer høyere spranghøyder enn de andre modellene. Simulering med sfærisk blokk (S4) gir markant lavere energiverdier enn alle andre simuleringer.

Tabell 21: Simuleringsresultater fra Hjelle, av data hentet ut fra ett punkt langs profil i faresone 1/100. RR = RAMMS Rockfall, RF3D = Rockyfor3D, RF = RocFall2, KT = kartlagt terreng, LM = lump mass i RF, RAS = rapid automatic simulation i RF3D.

Simulering fra Hjelle	Justert parameter	Gjennomsnittlig total kinetisk energi [kJ]			Gjennomsnittlig spranghøyde [m]		
		RF	RF3D	RR	RF	RF3D	RR
S1	Referanseverdi (1 m^3 , rektangel, KT)	63	160	2242	1,07	0,54	7,64
S2	Blokkvolum (5 m^3)	641	3932	5603	1,44	1,07	4,54
S3	Blokkvolum (10 m^3)	1265	7032	15404	1,70	2,61	4,90
S4	Blokkform (sfære)	356	772	23	0,64	0,82	0,60
S5	Blokkform: (ellipse)	163	859	1592	0,77	1,65	0,92
S6	Bakketype (ekstra hard)	2904	1244	2004	6,42	1,52	6,20
S7	Bakketype (medium hard)	139	74	0	1,06	0,67	0,00
S8	Analysemodell (LM/RAS)	310	338	-	0,00	0,61	-

Tabell 22: Simuleringsresultater fra Barstadvika, av data hentet ut fra ett punkt langs profil i faresone 1/100. RR = RAMMS Rockfall, RF3D = Rockyfor3D, RF = RocFall2, KT = kartlagt terreng, LM = lump mass i RF, RAS = rapid automatic simulation i RF3D.

Simulering fra Barstadvika	Justert parameter	Gjennomsnittlig total kinetisk energi [kJ]			Gjennomsnittlig spranghøyde [m]		
		RF	RF3D	RR	RF	RF3D	RR
S1	Referanseverdi (1 m ³ , rektangel, KT)	850	781	1008	3,55	1,25	4,77
S2	Blokkvolum (5 m ³)	3561	4028	3307	3,60	1,57	7,01
S3	Blokkvolum (10 m ³)	6677	9017	10399	3,72	1,80	6,68
S4	Blokkform (sfære)	803	776	100	0,79	1,39	0,63
S5	Blokkform: (ellipse)	622	983	752	1,47	1,71	4,35
S6	Bakketype (ekstra hard)	1484	1112	790	4,90	1,90	6,49
S7	Bakketype (medium hard)	813	484	781	3,52	1,13	5,50
S8	Analysemodell (LM/RAS)	739	703	-	0,00	1,20	-

5 Diskusjon

5.1 Vurdering av sensitivitet

Det er tidligere erfart at modellverktøy kan produsere svært varierende resultat av spranghøyder og energinivå (Berger & Dorren, 2006; Bjørndal, 2011; Dorren & Kuhne, 2016), men systematiske forskjeller har derimot foreløpig ikke vært veldokumentert. I denne masteroppgaven er det derfor gjennomført en sensitivitetsanalyse for å vurdere i hvor stor grad valg av modellverktøy, og justering av relevante inngangsparametere, påvirker resultat av total kinetisk energi og spranghøyder og videre dimensjonering av steinspranggjerdet. Dette kapitlet omfatter diskusjon av resultat, hvor hovedfunn for hver av de justerte inngangsparametere (blokkvolum, blokkform og bakketype) og modellens sensitivitet for disse er vurdert. Det må presiseres, at på grunn av de utallige variabler som påvirker faktiske steinspranghendelser er det ikke trivielt å si hva som er "riktig" modelleringsresultat, og derfor er kun relative forskjeller mellom modellenes simuleringresultat analysert.

Modellverktøy som vurderes og sammenlignes er RocFall2 (RF), Rockyfor3D (RF3D) og RAMMS Rockfall (RR), og inngangsparametere som er justert er blokkvolum, blokkform og bakketype, i tillegg er det gjort simuleringer med rapid automatic simulation (RAS) i RF3D og lump mass i RF.

5.1.1 Påvirkningen av blokkvolum på total kinetisk energi og spranghøyder

Energinivåer

Resultatene viser at justert blokkvolum påvirker energinivåene i stor grad, hvor økt blokkvolum gir større energinivåer for alle modellene. Dette er forventet da massen av blokken er en direkte komponent for beregning av den kinetiske energien (Formel 4), og størrelse og tetthet på blokken påvirker hvor høy energi som er mulig å oppnå (Turner & Schuster, 2012; Labiouse & Heidenreich, 2009). Større blokker vil også være mindre påvirket av bakkeruhet. Bakkeruhet påvirker hvordan blokken beveger seg og hvor mye av blokkens energi som dempes, avhengig av størrelsesforholdet til blokken og hindringen (Domaas & Grimstad, 2014; Kirkby & Statham, 1975; Dorren, 2003). For dimensjonering av sikringstiltak er dermed riktig valg av blokkvolum avgjørende for fastsetting av ønsket sikringsmål og energikapasitet på steinspranggjerdet.

Resultatene fra blokkvolumjusteringen viser store forskjeller på energinivå mellom modellene for de respektive simuleringene. RF har tydelig lavest energinivå for begge testområder. For RF3D og RR er det i Barstadvika observert relativt like profiler, mens for Hjelle viser RF3D

større økning av energi enn RR tidlig i helningsprofilen, mens RR viser størst energinivå i faresoner.

RF er den modellen som er minst påvirket av justeringen og gir vesentlig lavere energinivåer for alle tre blokkstørrelser sammenlignet med de andre modellene. Resultater for lave verdier i RF kan skyldes at "bruk tangentiell CRSP demping" er brukt, hvor restitusjon i tangentiell retning aktiveres og blokken vil dermed oppleve mer demping i kontakt med underlaget.

Totalt sett, indikerer resultatene at ved fastsettelse av energikapasitet på sikringstiltak kan valg av modell gi utslag og er noe man bør være oppmerksom på. Resultatene indikerer derimot at valg av modell er mindre avgjørende for simuleringer med mindre blokkvolum, da spredningen av resultatet mellom modellene er større jo større blokkvolumet er.

Spranghøyder

Med 2D-simulering og laboratorieeksperiment av steinsprang studerte Nagendran og Ismail (2019) effekten av blokkform, blokkvolum og bakketype på spranghøyder og utløpslengder. Resultatene indikerte, blant annet, at lette steiner spretter høyere enn tyngre steiner.

I denne oppgaven viser resultatene, ved justert blokkvolum, at RF er lite påvirket av justeringen hvor justering av blokkvolum gir ingen til liten grad utslag i spranghøyder langs profil. Blant modellene produserer RR generelt høyest og RF3D lavest spranghøyder langs profil (se diskusjon kap. 5.1.5). RF3D er lite påvirket, men viser tendenser til at blokkvolum på $1 m^3$ gir mindre spranghøyder enn blokkvolum på 5 og $10 m^3$. Dette kan skyldes selve størrelsen på blokken, da avstanden fra massesenter til underlaget vil være større for en større blokk. RR er lite påvirket av justeringen for simuleringer gjort i Barstadvika, men produserer varierende resultat i Hjelle.

Felles for alle modellene er at de responderer mindre på justert blokkvolum i Barstadvika enn i Hjelle. Dette er sannsynligvis på grunn av at Hjelle og Barstadvika har ulik helningsgeometri som påvirker resultatene ulikt. Barstadvika har en trappelignende helningsprofil, mens Hjelle har en slakere og større (både i høydemeter og distanse) helningsprofil. Dette korrelerer med funn gjort av Asplin (2021), som fant liten grad av korrelasjon mellom blokkvolum og spranghøyder i RR, og argumenterer at grunnen kan være at bratte skrenter (slik som i Barstadvika) fører til at blokkene i hovedsak er i fritt fall, hvor vekten av massen får mindre effekt på spranghøydene.

Totalt sett tyder resultatene på at modellenes spranghøyder er lite påvirket av justert blokkvolum og at det er andre grunner (e.g terrengparametere og helningsgeometri) som fører til variasjon i spranghøyder (se diskusjon kap. 5.1.5).

5.1.2 Påvirkningen av blokkform på total kinetisk energi og spranghøyder

Ved bruk av numerisk modellering og felteksperiment kvantifiserte Glover (2015) blokkens variasjon i nedslag, som en funksjon av blokkens form. Glover (2015) konkluderer med at variabilitet av nedslag, forårsaket av blokkens form, er forankret i de iboende forskjellene av treghetsmomentet til en steinblokk.

Blokkens utforming og kinematiske forhold (translasjon, rotasjon og nedslagsvinkel) påvirker også hvordan blokken spretter og hvor langt den går (Turner & Schuster, 2012; Labiouse & Heidenreich, 2009; Domaas, 1995). Tester utført med ulike blokkformer viser at blokkens konfigurasjon ved sammenstøt (f.eks. blokkens sidekanter eller hjørnepunkt) har en betydelig innflytelse på blokkens bevegelse under og etter støt (Labiouse & Heidenreich, 2009). For sfærisk og ellipseformet blokk er det forventet at blokken oppnår større energinivåer enn for en rektangulær blokk, da disse vil oppnå mindre friksjon siden de ikke har kanter som vil slå og pløye ned i bakken (Labiouse & Heidenreich, 2009; Domaas & Grimstad, 2014). Tidligere studier har også vist at plutselige endringer eller ujevnheter i terrenget kan føre til at blokker skyter fart og får høy rotasjon ut av helningen (Domaas, 1995). I tillegg viser eksperiment gjennomført av Nagendran og Ismail (2019) at sfæriske blokker først spretter høyt og deretter ruller lengre enn andre blokker.

Energinivåer

I RF gir sfæreformet blokk høyest og størst variasjon av energinivå langs profilene sammenlignet med de to andre blokkformene. Ellipseformet blokk og rektangulær blokk har energinivåer med mindre variasjon, hvor energinivåene samsvarer mer med hverandre. I RF er blokkens geometriske form hensynstatt. Rektangulær blokk i RF er kjørt med runde kanter, og kan muligens være årsaken til hvorfor ellipseformet blokk og rektangulær blokk samsvarer mer med hverandre enn med sfæriskformet blokk. Sfærisk form skiller seg ut ved at blokken har en lineær økning og plutselige fall i energi langs helningsprofilen. Den lineære økningen kan forklares ved at det under rulling oppstår høy rotasjon og økt kinetisk energi. Plutselige fall i energinivå ved overgang til flattere terreng kan sannsynligvis forklares med at modellen er svært sensitiv for endringer i helningsgeometrien (se kap. 5.1.5 om helningsgeometri), som samsvarer med tidligere studie hvor dette er vist (Hefre & Mo, 2020). Derimot, ser man plutselige fall i energinivå langs skråningen hvor flatt terreng ikke er tilstede, en mulig forklaring på dette kan være at simuleringer med sfærisk blokk i RF er mer sensitiv for valgt bakketype og små endringer i helningsgeometrien enn de to andre blokkformene. Det krever derimot nærmere analyse og større datamengde for å trekke en entydig konklusjon.

For energinivåer i RF3D stemmer resultatene overens med det som er beskrevet innledningsvis; at simuleringer med ellipseformet blokk og sfærisk formet blokk gir høyere energinivåer enn rektangulær blokk. I RF3D beregnes tap av energi og posisjon av steinblokken alltid med en sfærisk form uavhengig av brukerdefinert blokkform. RF3D tar

derimot hensyn til den brukerdefinerte blokkformens treghetsmoment, noe som kan forklare spredningen i resultatet da sfæriske og ellipseformede blokker har større evne til å rotere (Domaas, 1995). Sfæriske blokkformer har en tendens til å ha et massesenter nærme rotasjonsaksen, mens vinkelformede blokker kan ha sitt massesenter lenger vekk fra rotasjonsaksen som resulterer i et større treghetsmoment (Formel 1). Et større treghetsmoment krever et større kraftmoment for å øke eller endre rotasjonsfarten på objektet noe som kan forklare hvorfor rektangelformet blokk har lavere energinivåer enn ellipseformet og sfæriskformet blokk. Forskjellen på energinivåer mellom blokkformene i RF3D kommer tydeligst frem i toppen av ur og videre ned langs profil for begge områder (distanse etter 300 m for Hjelle (Figur 32), distanse etter 50 m for Barstadvika (Figur 33)). Dette kan skyldes at RF3D definerer bakkeruhet som relativ høy ved uren, hvor de ulike blokkene kan påvirkes ulikt.

I RR skiller sfærisk blokkform seg markant ut, med veldig lave energinivåer sammenlignet med samtlige andre simuleringer. I tillegg var simuleringer med sfærisk blokk problematisk da det var vanskelig å produsere nok variasjon i sprangbaner. Dette korrelerer med studie gjennomført av Hefre og Mo (2020) som tok for seg bruk av modellverktøy for faresonekartlegging. I studien kom det frem at sfærisk blokkform i RR gir lite variasjon i sprangbaner og svært korte utløp sammenlignet med andre simuleringer gjort i studiet. Dette kan skyldes at RR er en deterministisk modell som skaper variasjon i beregningene sine ved å variere blokkorientering ved utløsning. For en sfærisk blokk er orienteringen likegyldig, som fører til ingen variasjon i sprangbaner dersom utløsningspunkt er valgt. I denne masteroppgaven ble dette løst ved å kjøre enkelte simuleringer hvor utløsning var definert over et lite areal, noe som skapte variasjon i sprangbaner og ga større datagrunnlag. Dette tiltaket var derimot ikke nok for å få realistiske resultater for simulering med sfæreformet blokk. Totalt sett anbefales det derfor ikke å gjøre simuleringer med sfæreformet blokk i RR.

Spranghøyder

Både RF og RF3D gir lite utslag i spranghøyder ved justert blokkform. For begge modeller kan lite variasjon i spranghøyder forklares ved at blokkene mest sannsynlig ruller og glir mer enn de spretter langs profil, og at de største spranghøydene forekommer i bratte skrenter.

RR er den modellen med størst utslag på spranghøyder ved justering av blokkform. Sfærisk blokkform skiller seg markant ut med veldig lave spranghøyder sammenlignet med alle simuleringer for alle modellene. Dette er diskutert nærmere i seksjonen over (kap. 5.1.2 under "Energinivåer").

5.1.3 Påvirkningen av bakketype på total kinetisk energi og spranghøyder

Energinivåer

Resultatene tyder på at valg av bakketype påvirker energinivåene i stor grad. Dette er forventet da bakketype påvirker hvor mye av blokkens energi som tas opp i underlaget. Mykere underlag (f.eks. dyrket mark, sand- og grusbakker) absorberer mer energi og fører som regel til at sprangene dempes, mens hardere underlag har mindre dempende effekt (Domaas & Grimstad, 2014; Dorren, 2003; Nagendran & Ismail, 2019). En blokk kan miste opptil 75- 86% av energien som genereres i fritt fall ved første bakkekontakt (Dorren, 2003; Evans & Hungr, 1993).

Resultatene for RF3D og RR viser at mykere underlag gir lavere energinivåer og spranghøyder enn hardere underlag, noe som stemmer overens med virkeligheten. Dette gjelder også for RF i simuleringer gjort i Hjelle, men ikke i Barstadvika. RF skiller seg ut ved å ha størst spredning i resultatene sine noe som indikerer at RF er den modellen som er mest sensitiv for justering av bakketype. I tillegg viser modellen antydninger til ustabilitet i simulering med mykt underlag (Figur 37), hvor RF produserer energinivåer som øker unormalt mye ved foten av fjellsiden og videre i flatt terreng.

Resultatene viser også at RFs forskjell på energinivå i Hjelle mellom kartlagt terreng (S1) og ekstra hard (S6) er større enn forskjellen mellom kartlagt terreng (S1) og medium hard (S7). Dette kan forklares med at bakketyper som er brukt i kartlagt terreng består mer av myke bakketyper enn harde bakketyper (se simuleringsinnstillinger for RF i kap. 3.3.4). Denne effekten er motsatt for RR; forskjell på energinivå mellom kartlagt terreng og ekstra hard er mindre enn forskjellen mellom kartlagt terreng og medium hard. Som da kan forklares med at kartlagt terreng for RF består i hovedsak av bakketyper "ekstra hard" og "hard" (se simuleringsinnstillinger for RR i kap. 3.3.2), og dermed har likere inngangsverdier for simulering med ekstra hard (S6). RF3D har ikke disse merkbare forskjellene.

RF3D skiller seg ut ved å bruke to terrengparametere, en for bakketype og en for bakkeruhet, hvor den tangentielle restitusjonskoeffisienten beregnes basert på inngangsverdier av bakkeruhet. Bakkeruhet er en av de viktigste inngangsparameterne i RF3D, da modellen er svært sensitive for justering av denne (Dorren, 2016; Hefre & Mo, 2020). Bakkeruhet er derimot ikke justert eller vurdert i denne oppgaven.

Spranghøyder

For alle modellene tyder resultatet på at simuleringer med mykere underlag gir lavere spranghøyder enn simuleringer med hardere underlag. Dette er som forventet da mykere underlag som regel fører til at sprangene dempes (Domaas & Grimstad, 2014; Dorren, 2003; Nagendran & Ismail, 2019).

RF er den modellen med størst utslag ved justering av bakketype, som tyder på at modellen er mer sensitiv for justering av bakketype sammenlignet med RR og RF3D.

For RF er forskjellen størst mellom kartlagt terreng og ekstra hard, mens for RR er det omvendt hvor forskjellen er størst mellom kartlagt terreng og medium hard. Dette kan forklares ved at grad av utslag avhenger av hva som er brukt i kartlagt terreng for den aktuelle modellen. For RF samsvarer medium hardt terreng med kartlagt terreng, mens for RR samsvarer ekstra hardt terreng med kartlagt terreng.

RF3D er den modellen som reager minst ved justert bakketype og har ikke disse merkbare forskjellene i spranghøyder

5.1.4 Analysemodeller

Rigid body vs. lump mass i RocFall2

En vesentlig forskjell mellom lump mass og rigid body i RF er verdier for restitusjonskoeffisienten. Nyere studier viser at inngangsverdier av normal restitusjonskoeffisient (R_n) avhenger av valgt analysemodell (Rigid body eller Lump mass), hvor R_n i rigid body er signifikant lavere enn tilsvarende R_n for lump mass (Bar et al., 2016; Rocscience, 2023d). I denne oppgaven er modellen klargjort og kalibrert ved bruk av rigid body analysemodell, hvor like inngangsverdier av restitusjonskoeffisienten er brukt for både rigid body og lump mass. Man kan derfor forvente mer demping av blokk under nedslag i simulering med lump mass enn med rigid body, noe som er tilfellet for spranghøyder, men ikke for energinivå. For energinivåer har lump mass større variasjon og oppnår derfor større energitopper enn rigid body. Dette kan skyldes innstillinger i RF hvor "bruk tangentiell CRSP demping" er aktivert for rigid body og "consider rotational velocity" er aktivert for lump mass. Disse er ikke standardinnstillinger i modellen og bruker må manuelt aktivere funksjonene. Når "bruk tangentiell CRSP demping" brukes i rigid body er restitusjon i tangentiell retning aktivert, som bidrar til tap av energi i tangentiell retning. Når "consider rotational velocity" er aktivert i lump mass, er effekten av rotasjonshastighet på blokken (simulert som et punkt i lump mass) inkludert. Disse innstillingene er brukt for å oppnå mest mulig lik innstillinger mellom lump mass og rigid body. I simuleringer med rigid body er rotasjonshastigheten alltid inkludert (Rocscience, 2023b) og i lump mass er tangentiell restitusjon alltid aktivert.

Simuleringer med lump mass i RF gir lavere spranghøyder enn rigid body, med spranghøyder tilnærmet 0 m langs profil (sett bort fra områder med fritt fall). Dette kan skyldes valg av restitusjonskoeffisient som forklart i avsnittet over, eller også at lump mass simulerer steinblokk som et massepunkt og ikke med en gitt geometrisk form slik som i rigid body. Rigid body tar hensyn til gliding, velting og rull av steinblokken, mens lump mass kun simulerer sprang og gliding (selv om effekten av rotasjonshastighet er medregnet).

"Rapid automatic simulation" vs. manuell input i Rockyfor3D

Generelt sett bruker RAS lave/pessimistiske inngangsverdier av bakkeruheter og bakketype, som regnes ut på grunnlag av helningsgradienten (Dorren, 2016). Det er derfor forventet at RAS produserer høyere energinivåer enn simulering 1 som bruker kartlagt terreng. Resultatene viser derimot det motsatte, sett bort fra de høye energiverdiene i flatt terreng. Resultatene viser at RAS produserer lavere tot. kinetisk energi og spranghøyder enn simulering 1 hvor kartlagt terreng er brukt som terrengparametere. Dette til tross for at inngangsverdiene for bakkeruhet er lavere i RAS enn simulering 1 med kartlagt terreng. En mulig forklaring for de lave energinivåene kan være at blokkene ruller og glir mer i RAS (i samsvar med resultater av spranghøyder), som gjør at blokken opplever mer friksjon.

I simuleringer med rapid automatic simulation (RAS) i RF3D er det observert en unormal økning av total kinetisk energi og spranghøyder ved foten av fjellsiden når terrenget flater ut i både Hjelle og Barstadvika. Hvorfor dette skjer er uklart, men kan tenkes at er på grunn av feilaktige vurderinger gjort av RAS i den automatiske konverteringen for bakketype og bakkeruhet.

5.1.5 Effekt av helningsgeometri

Generell effekt av helningsgeometri

Det er større spredning i resultatene mellom modellene for simuleringer gjort i Hjelle enn i Barstadvika, og dette kan skyldes forskjellig helningsgeometri for de to studieområdene (se Figur 15 for helningsprofiler). Hjelle strekker seg over et lengre område både i lengde og høyde, mens Barstadvika består av to bratte skrenter og kort distanse på ur som gjør at blokkene i større grad er i fritt fall, og som følge av dette har mindre interaksjon med terrenget. Blokk-bakke-interaksjon er en kompleks prosess hvor helningsgeometrien er avgjørende for hvordan blokken beveger seg (Figur 4). Hvis den gjennomsnittlige skråningsgradienten er mindre enn ca. 45° endrer blokkens bevegelse seg gradvis fra spretting til rulling, og en rullende blokk er nesten konstant i kontakt med skråningsflaten (Dorren, 2003; Evans & Hungr, 1993; Ritchie, 1963). De utvalgte modellverktøyene beregner blokk-bakke-interaksjonen ulikt hvor terrengparametere vurderes forskjellig (Chau et al., 2002; Volkwein et al., 2011). Blokk-bakke-interaksjonen påvirker simuleringsresultatet i stor grad, og man kan derfor anta at det er større variasjon og spredning i resultatet mellom modellene jo mer interaksjon blokken har med terrenget, og dette kan antas å være tilfellet for Hjelle.

Overordnet viser resultat at maksnivåer innad i RF, for gjennomsnittlig total kinetisk energi og spranghøyder, utmerker seg ved å oppnå maks energinivå og maks spranghøyde på omtrent samme område langs profil for alle simuleringer (distanse rundt 50 m i Barstadvika og rundt 200 i Hjelle), utenom for S6 og S4 i Hjelle for total kinetisk energi. Disse maksnivåene forekommer i område med store skrenter, og man ser ellers tydelig økning av total kinetisk energi og spranghøyder i bratte skrenter langs profil, som indikerer at RF

responderer sterkt på store høydeforskjeller i terrenget. Sammenlignet med de andre modellene oppnår RF maksnivå tidligst i sprangbanen, som kan forklares ved at de største skrentene forekommer tidlig langs profilene, noe RF responderer sterkt på. RF3D oppnår også maksverdier gjentakende omtrent på samme områder i helningsprofilen, men med noe mer variasjon enn RF. Utover dette viser ikke RF3D den samme sensitiviteten til helningsgeometrien og terrenget sammenlignet med RF. RR er den modellen som har mest variasjon for når maksverdier oppnås langs helningsprofilen, og variasjonen som oppstår forekommer mest for simuleringer gjort i Hjelle.

2D vs. 3D

Generelt sett er variasjonen i energinivå og spranghøyder langs profil større for RR og RF3D enn RF. Denne variasjonen er i tillegg større enn det som kommer frem i den grafiske fremstillingen da det er gjort filtering med Zavitzky-Golay filter for å jevne ut data i RR og RF3D-resultatene. RF har relativt mindre svingninger i energinivå og spranghøyde langs profil, og filtrering var derfor ikke nødvendig. Den store variasjonen kan skyldes at RR og RF3D simulerer steinsprang i 3D, mens RF simulerer steinsprang i 2D. Dette innebærer at alle utløste blokker i RF har samme sprangbane som følger helningsprofilen, mens blokkene i RR og RF3D kan bevege seg på skrått og tvers av fjellsiden. Dataen fra RR og RF3D er hentet ut langs utvalgte profiler, og kan dermed stamme fra blokker med flere ulike sprangbaner.

En fordel med 2D-simulering er at man kan studere enkelte sprangbaner i mer detalj, men en ulempe er at den naturlige bevegelsen til blokken hindres og begrenses til profilen. Man kan på grunn av dette ikke utelukke at 3D-simuleringer kan gi et mer realistisk bilde av situasjonen. Den mindre variasjonen av energi- og sprangverdier langs helningsprofil for RF kan også skyldes at det er gjennomført "simplify slope" i RF som jevner ut helningsprofilen i modellen.

Effekt av helningsgeometri på målte spranghøyder

RF3D gir generelt lavere spranghøyder langs profil enn RF og RR. En av grunnene til dette er at spranghøyder i RF3D er målt i normalretning fra bakken (slik som et steinspranggjerdet vil stå) til blokkens massesenter, mens RR og RF oppgir spranghøyder som den vertikale distansen fra bakken til blokkens massesenter. Dette gir spesielt utslag i bratte skredløp og ved høye bratte skrenter, hvor spranghøyder målt normalt på bakken vil være mindre enn spranghøyder målt vertikalt på bakken (Figur 8). Dette gjør sammenligning av spranghøyder noe komplisert, men kan forklare hvorfor RF og RR har spranghøyder som samsvarer i de bratte skrentene langs profil. På tross av dette produserer RR generelt høyere spranghøyder enn RF.

5.1.6 Er valg av modell avgjørende for dimensjoneringen?

Resultatene i denne studien viser stor spredning i energinivå og spranghøyder både mellom modellene og innad i hver enkelt modell når inngangsverdier blir justert.

Ved dimensjonering av steinspranggjerdet er faresoner ofte brukt som dimensjonerende sikringsmål, og Tabell 21 og Tabell 22 viser hvor stor variasjon de ulike modellene og simuleringene gir i faresone 1/100 for de utvalgte studieområdene. Simulering 2 i Hjelle med blokkvolum på 5 m³ viser eksempelvis at RF, RF3D og RR har energinivåer på henholdsvis 641, 3932 og 5603 kJ, og spranghøyder på 1,44, 1,07, og 4,54 meter. Tabellene tydeliggjør forskjellene mellom modellene, og bekrefter at valg av modell kan gi store utslag på valg av høyde og energinivå for sikringstiltak. Det er viktig å poengtere at sikringstiltak plasseres horisontalt langs fjellsiden, og Tabell 21 og Tabell 22 representerer kun ett punkt i sprangbanen. I tillegg er spranghøyder og energi oppgitt som gjennomsnittsverdi over simulerte blokker. Vanligvis ved prosjektering ville man sett på verdier langs en linje eller mindre område, og andre statistiske former av simuleringresultatet (e.g 95 persentil) hadde blitt brukt.

Funn gjort av Dorren og Kuhne (2016) indikerer at dersom RR og RF3D hadde blitt brukt til dimensjonering av steinspranggjerdet ville samme energikapasitet på steinspranggjerdet blitt valgt, men høyden på steinspranggjerdet ville vært ulikt. De gjennomførte derimot kun en simulering (med flere blokkutløsninger) per modell, og fjernet ekstremverdier fra simuleringresultatet før sammenligningen. Intensjonen med studien var å demonstrere at ekspertens tolkning og forståelse av modellverktøyet spiller en viktig rolle når simuleringresultat tolkes. Hind (2018) sammenlignet RF og RR for å se på forskjeller mellom 2D og 3D-modeller. Resultatene fra Hind (2018) viser at RR (3D-modell) generelt kalkulerer høyere spranghøyder og tot kinetisk energi enn RF (2D-modell), spesielt på slakere helninger. Dette korrelerer med resultatene i denne studien, hvor RF produserer lavere energinivåer og spranghøyder enn RR. En viktig bemerkelse er at resultatene for spranghøyder i denne masteroppgaven viser at RR skiller seg ut ved å produsere høyere spranghøyder enn både RF3D og RF.

5.2 Modellprestasjon for dimensjonering av steinspranggjerde

Modellenes ytelse er vurdert for å avgjøre om en eller flere av modellene er mer egnet for dimensjonering av steinspranggjerde i Norge. Tabell 23 viser en oppsummert oversikt over modellenes ytelse og dens robusthet som er vurdert basert på sensitivitetsanalysen og totalopplevelsen av modellene.

Tabell 23: En oversikt av opplevd modellytelse til bruk for dimensjonering av steinspranggjerde Grønn: oppleves som en fordel. Rød: Oppleveres som en ulempe. Oransje: oppleves som både en fordel og en ulempe. RAS = Rapid automatic simulation.

	Ramms Rockfall	Rockyfor 3D	RocFall2
Programvarens brukergrensesnitt	Detaljert.	Enkel.	Detaljert og omfattende.
Klargjøring av modell	Enkel og intuitivt.	Enkel og intuitivt, men mer tidkrevende. (Kan klargjøres raskt ved bruk av RAS).	Omfattende, men intuitivt.
Simuleringstid	Ustabil, til tider kort og til andre tider lengre avhengig av simuleringsinnstillinger (minutter til timer).	Kort (sekunder til minutter). Lengre ved bruk av RAS (flere timer).	Kort (sekunder til minutter).
Resultatfiler	Forståelig og detaljert.	Forståelig og detaljert.	Forståelig og detaljert.
Alternative analysemodeller	Nei.	Ja, manuell kartlegging eller simulering med RAS.	Ja, rigid body eller lump mass.
Robusthet	Robust.	Robust.	Mindre robust.
Muligheter for kalibrering av modell (Se kap. 2.4.1)	Få muligheter for å kalibrere modell.	Mange muligheter for å kalibrere modell.	Mange muligheter for å kalibrere modell.
Muligheter for å analysere resultater	Mange muligheter.	Kun en mulighet i etterkant av simuleringene, men mulig å kjøre simuleringer med	Mange muligheter, og flere spesifikt for vurdering av sikringstiltak.

		sikringstiltak og samle inn data langs en linje.	
Pris og lisensstruktur	<p>Dyr</p> <p>Pris årlig lisens ca 36 700 NOK. Kan også kjøpe lisens for kortere eller lengre perioder.</p> <p>Lisensen er ikke fleksibel og kan kun installeres på en PC.</p>	<p>Billig</p> <p>Gratis for medlemmer i Ecoris. Medlem tegnes årlig og koster ca 1000 NOK per år for personlig lisens og ca 2 600 – 5 200 NOK per år for bedrifter, avhengig av størrelse på bedriften.</p> <p>Lisensen er fleksibel og trenger ikke å være installert på kun en PC.</p>	<p>Relativt billig</p> <p>Pris personlig lisens (ikke fleksibel) er henholdsvis ca 9 300 NOK og 18 700 NOK for årlig leie og evig lisens.</p> <p>Pris fleksibel årlig leie er ca 16 600 NOK som inkluderer oppdateringer og teknisk support.</p> <p>Pris fleksibel "evig" lisens er ca 31 000 NOK som inkluderer oppdateringer og teknisk support i 12 mnd. Etter dette fryses versjonen og oppdaterte versjoner må leies årlig.</p>

Kort oppsummert, skårer RF3D høyest og vurderes som best egnet for dimensjonering av sikringstiltak, mens RR og RF skårer lavere og vurderes som mindre egnet for dimensjonering av sikringstiltak. Dette er til dels overraskende da RF var antatt som et bra alternativ for vurdering og dimensjonering av sikringstiltak grunnet dens mange muligheter for detaljerte analyser. Analysemulighetene i RF er derimot ikke testet og vurdert. Om dette var gjort kunne RF potensielt ha skåret høyere på opplevd ytelse og egnethet til bruk for dimensjonering av sikringstiltak

RR oppleves som robust, men har noen svakheter man må være oppmerksom på. Det første er simulering med sfærisk blokk, som gir svært lave og unormale verdier, og ikke anbefales å tas i bruk. Det andre er at modellen produserer relativt høye spranghøyder sammenlignet med RF3D og RF. Dette samsvarer med Dorren og Kuhne (2016), hvor resultatene viste at RR hadde systematisk høyere spranghøyder enn RF3D. Videre konkluderte de med at begge

modellene er stabile og at simuleringresultatene er plausible, men uavhengig av den anvendte modellen er ekspertens tolkning avgjørende for den endelige analysen.

RF3D oppleves som en robust modell med stabile resultat, og ingen simuleringer skiller seg markant ut sammenlignet med de andre modellene (sett bort i fra simulering med RAS). Det anbefales ikke å bruke RAS ved dimensjonering av sikringstiltak da automatisk definering av terrengparametere fører til større usikkerhet i resultatet, noe som ikke egner seg for dimensjonering av sikringstiltak. En fordel med RF3D er at modellen måler spranghøyder i normal retning fra bakken slik som et steinspranggerde vil stå, og dette er gunstig og mer intuitivt ved fastsetting av høyde på steinspranggerdet. Justering av ruhet i RF3D er derimot ikke studert. Bakkeruhet er en av de viktigste inngangsparametere i RF3D, og valg av verdier trenger en del oppmerksomhet da modellen er svært sensitive for disse (Dorren, 2016; Hefre & Mo, 2020). Dette er også erfart under arbeidet med masteroppgaven ved klargjøring av modellen. Justering av bakkeruhet opplevdes derimot som en fordel da det tilførte en ekstra parameter som egnet seg godt til å kalibrere/klargjøre modellen.

RF vurderes som mindre robust og mindre egnet til bruk for dimensjonering av sikringstiltak. Modellen produserer ustabile, og i ett enkelt tilfelle ikke realistisk, resultat (simulering 7 i Barstadvika). Under klargjøring av modell var det utfordrende å gjennomføre simuleringer med vinkelformede blokker, da dette førte til ustabilitet i modellen ved at simuleringer ikke kunne gjennomføres. Dette ble løst ved å simulere med runde kanter istedenfor spisse kanter når rektangelformet blokk ble brukt (Simulering 1-3 og simulering 6-7). RF har svært mange kalibreringsmuligheter, men dette oppleves som utfordrende da det krever utstrakt kunnskap og erfaring med bruk av modellen. Eksempelvis opererer modellen med mange innstillinger og parametere, hvor man blant annet må ta stilling til valg av R_n -verdier. Dette er utfordrende da RF har vist seg å være svært sensitiv for valg av R_n . I RR og RF3D defineres R_n automatisk når bakketype velges. I tillegg er modellen svært sensitiv for endringer i helningsgeometrien. Dette korrelerer med funn fra Hefre og Mo (2020), som studerte maks simulerte utløpslengder på blokkene, hvor RF generelt produserte varierende utløpslengder ved justering av inngangsparametere og andre innstillinger. Blokkene i RF har også en tendens til å stoppe raskt når de kommer på flatt terreng og er sensitiv for oppoverbakker i helningsprofilen (Hefre & Mo, 2020), noe som også erfares i arbeidet med denne masteroppgaven. Dette er ikke ideelt for å få realistiske resultater ved dimensjonering av steinspranggerde, da steinspranggerde ofte plasseres ved foten av uren og i flatere terreng. Vedrørende sensitivitet for justert blokkvolum er RF den modellen som skiller seg mest ut blant de tre modellverktøyene ved å produserer vesentlig lavere energinivåer for alle volumklasser, (Figur 28, Figur 29, Tabell 21 og Tabell 22). Dette er noe man bør være oppmerksom på ved bruk av modellen for dimensjonering av sikringstiltak.

5.3 Usikkerheter

Generelle usikkerheter relevante for studien i denne oppgaven er listet opp under.

- Datamengde: I sensitivitetsanalysen er mengden data relativt liten og kan på grunn av dette delvis påvirke gyldigheten av resultatene, og videre vanskeliggjøre det å trekke endelige konklusjoner.
- Validering av simuleringsresultat: Steinsprang er en kompleks prosess avhengig av et stort antall parametere og usikkerheter. På grunn av dette vil man sjeldent ha "fasitverdier" å sammenligne resultater med, og å trekke konklusjon for hvilket modellverktøy som har mest representativ resultat for hver simulering er derfor ikke trivielt.
- Databehandling: Det er gjennomført filtrering av dataen med Savitzky-Golay filter for RF3D og RR, men ikke for RF (se kap. 3.4 om databehandling). Se vedlegg A, B, C og D for rådata av alle simuleringer. I tillegg er data fra resultatfilene hentet ut punktvis for hver meter langs profil. For RF3D og RR er ArcGIS Pro brukt, og data langs profil er derfor hentet ut likt. For RF er data hentet ut direkte fra programmet, og man kan derfor anta at punktene i RF har noe avvik i posisjon sammenlignet med tilsvarende punkter i RF3D og RR. Dette fører til at enkelte grafiske fremstillinger starter med resultatverdi lik 0 ved distanse 0 m, mens andre starter med resultatverdi over 0 ved distanse 0 m. Dette skyldes at i enkelte simuleringer er data fra første punkt hentet ut like før utglidning av blokk, mens i andre simuleringer er data fra første punkt hentet ut like etter utglidning. Sistnevnte resulterer dermed i grafer som starter med spranghøyde eller energi > 0 m eller 0 kJ.
- Brukerpåvirkning: Det er generelt sett stor spredning i resultatet mellom modellene. Dette kan skyldes at modellene definerer terrengparametere ulikt (e.g bakketype, ruhet, restitusjonskoeffisienter), og disse kan tolkes ulikt fra bruker til bruker. Berger og Dorren (2006) gjennomførte et eksperiment hvor 12 konsulenter fra fire ulike land simulerte 100 blokker i 2D eller 3D i et utvalgt studieområde. Resultatfilene ble deretter sammenlignet med data innhentet fra ekte steinsprang felteksperiment som ble gjennomført i samme studieområde. Resultatene av eksperimentet viste at to forskjellige brukere kan oppnå svært forskjellige resultater med samme modell. Dette indikerer at ekspertens rolle når modellverktøy brukes er avgjørende for vurdering av fare og sikringstiltak.
- Digital terrengmodell (DEM): DEM-oppløsning på 1 meter er brukt i denne studien. Høy oppløsning (e.g. 0,5 og 1) kan derimot føre til mer ruhet i terrenget, noe modellverktøyene er svært sensitiv for. Lav DEM-oppløsning (e.g 10 og 20 m) jevner ut terrenget som igjen kan påvirke simuleringsresultatet, hvor lavere oppløsning har vist seg å muligens gi høyere verdier av spranghøyder og energi (Agliardi & Crosta, 2003; Crosta et al., 2015; Noël et al., 2021). RF3D viser til erfaringer for at 1 meter

oppløsning ikke nødvendigvis forbedrer kvaliteten og at mengde data øker betydelig, og anbefaler derfor en oppløsning mellom 2-10 meter (Dorren, 2003, fra; Dorren & Heuvelink, 2004). RR anbefaler minimum DEM-oppløsning på 2-5 meter for å oppnå realistiske simuleringsresultat i sin modell (RAMMS, 2022). I RF, hvor helningsprofil er hentet ut med høy DEM oppløsning, oppstår det ofte mange punkter i profilet og fra brukermanualen anbefales det å jevne ut helningsprofilet ved bruk av funksjonen "simplify slope" (Rocscience, 2023j). Dette fører derimot til økt usikkerhet i resultatet da viktige detaljer i terrenget kan forsvinne.

- Resultatfiler: I modellene kan simuleringsresultatet bli representert i ulike statistiske former (e.g. gjennomsnitt, Q95-persentil, Q98-persentil, max-verdier). I denne oppgaven er gjennomsnittsverdier brukt for å vurdere modellene, men for dimensjonering av steinspranggjerdene er som regel høyere statistiske persentiler av resultatet brukt for å fastsette designparametere for videre dimensjonering av steinspranggjerdene (mer om dette i teorikap. 2.4.1).

5.4 Videre arbeid

En utfordring er å dimensjonere sikringstiltak for ønsket sikringsmål. Dersom eksempelvis faresone 1/100 brukes som dimensjonerende sikringsmål er det kun dette skredscenarioet man tar høyde for å sikre mot. Det vil si at blokker som går betydelig lengre enn dette kan representere et 1000-års eller 5000-års skred, og har dermed sannsynlig større hastighet og energinivåer. Disse blokkene er derfor ikke representable dersom man ønsker å sikre mot skred i faresone 1/100. I slike tilfeller ønsker man derfor å fjerne disse blokkene fra dimensjoneringsgrunnlaget. En mulig løsning på dette er å enten kalibrere modellen slik at blokkene ikke går lenger enn ønsket skredscenario. En annen løsning er å kalibrere modellen ut fra beste vurdering fra felt og deretter fjerne sprangbaner som går lengre enn ønsket skredscenario før man starter analysen av simuleringsresultatet. Disse løsningene er derimot avhengig av kalibreringsmulighetene og analysemulighetene til modellverktøyet. Videre arbeid kan derfor med fordel være å teste og vurdere modellenes kalibrerings- og analysemuligheter for dimensjonering av sikringstiltak mot steinsprang. En måte å gjøre dette på er å bruke modellene til å dimensjonere sikringstiltak basert på et utvalgt skredscenario. På denne måten kan modellenes egnethet til bruk for dimensjonering av sikringstiltak og dens tilhørende analysemuligheter testes ut. Om de ulike modellene fører til samme eller forskjellig høyde og energi på sikringstiltaket vil også komme frem. Kapittel 2.5, under "resultatfiler og analysemuligheter" for hver av modellene, beskriver kort ulike analysemuligheter den aktuelle modellen tilbyr.

Det er behov for større datagrunnlag i sensitivetsanalysen. Flere simuleringer fra flere studieområder med ulik helningsgeometri er nødvendig for å trekke endelige konklusjoner. Videre arbeid og utvidelse av denne masteroppgaven er derfor fordelaktig. Effekten av justering av andre parametere bør, blant annet, vurderes. Eksempelvis kan simulering med skog (for RR og RF3D), justering av DEM, og justering av bakkeruhet (for RR og RF3D)

vrderes. Både RF3D og RR har mulighet til å inkludere skog i simuleringene, mens RF ikke har denne muligheten. Skog bidrar til en dempende effekt på steinspranget, og det er gjort flere studier på effekten av å implementere skog som et beskyttende tiltak mot steinsprang (Agliardi & Crosta, 2003; Bigot et al., 2009; Dorren & Berger, 2006; Dorren et al., 2006; Getzner et al., 2017). Det er derfor vesentlig å ta hensyn til denne dempende effekten ved dimensjonering av sikringstiltak i de områder dette er aktuelt.

6 Konklusjon

Denne masteroppgaven tar for seg bruk av modellverktøy for dimensjonering av steinspranggjerdet mot steinsprang. Oppgaven omfatter en sensitivitetsanalyse for uttesting og sammenligning av utvalgte modellverktøy, avslutningsvis er modellverktøyenes ytelse og egnethet vurdert. Modellverktøy som testes og sammenlignes er RocFall2 (RF), Rockyfor3D v5.2 (RF3D) og RAMMS Rockfall v1.7 (RR). Inngangsparametere som er justert er; blokkvolum, blokkform og bakketype. Det er også gjort simuleringer med "rapid automatic simulation" (RAS) i RF3D og lump mass i RF. I tillegg er effekt av helningsgeometri vurdert.

Foreløpige konklusjoner og anbefalinger er gitt på bakgrunn av resultatene. Datamengden i sensitivitetsanalysen er liten og andre brukere eller andre studieområder kan tenkes å gi andre resultater.

Resultatene i denne oppgaven viser systematiske forskjeller mellom modelleverktøyene, som tyder på at valg av modellverktøy kan gi utslag på valg av høyde og energinivå på steinspranggjerdet. Resultatene indikerer at valg av modell er mindre avgjørende i studieområder som i hovedsak består av bratte og høye skrenter, slik som i Barstadvika, fordi en slik helningsgeometri fører til at blokken i større grad er i fritt fall og dermed har mindre interaksjon med terrenget. Dette gir mindre variasjon i simuleringene og dermed mindre forskjeller mellom modellene.

Basert på sensitivitetsanalysen er følgende vurdering tatt:

- **Blokkvolum:** Økt blokkvolum gir betydelig større energinivåer for alle modellene, og valg av blokkstørrelse krever en god del oppmerksomhet for å fastsette korrekt energikapasitet på sikringstiltaket. Resultatene indikerer at valg av modell er mindre avgjørende for fastsettelse av energimengde når det gjøres simuleringer med mindre blokker (1 m^3) enn med større blokker (10 m^3). RF produserer vesentlig lavere energinivåer enn RF3D og RR ved økt blokkvolum. For spranghøyder indikerer resultatene at modellene er lite påvirket av justert blokkvolum, men det er viktig å ta hensyn til størrelsen av blokken ved fastsetting av høyde på sikringstiltak.
- **Blokkform:** Det er stor spredning i resultatet og effekten av justert blokkform er ikke entydig blant modellene. RF3D produserer resultat hvor ellipsoformet og sfæreformet blokk har høyere energi og spranghøyder enn rektangulær blokk. RF og RR viser for sfæreformet blokk høy sensitivitet. RR gir med sfæreformet blokk generelt veldig lave verdier for spranghøyde og energi. RF gir samsvarende middelverdier mellom alle blokkformene, men større variasjon for sfæreformet blokk. På bakgrunn av dette bør man være forsiktig med å benytte sfæreformet blokk i simuleringer for dimensjonering av sikringstiltak. Generelt kan det anbefales å kjøre flere simuleringer med ulike blokkformer i sikringsarbeid.

- **Bakketype:** Det er tydelig at simulering med mykere underlag generelt gir lavere energi og spranghøyder enn hardere underlag. Videre indikerer resultatene at RF er den modellen som er mest sensitiv for justering av bakketype. Eksempelvis produserte modellen en unormal økning av energi i flatt terreng med simulering med medium hard underlag. RF3D er den modellen som reager minst ved justert bakketype for spranghøyder. Generelt kan man se store forskjeller ved bruk ulike bakketyper i forhold til kartlagt terreng, som understreker behovet for godt feltarbeid og grundig kartlegging for å gi modellene mest representative inngangsparamtere for arbeid med sikringstiltak.

Modellverktøyenes ytelse er vurdert for å avgjøre om en eller flere av de utvalgte modellverktøyene er mer eller mindre egnet for dimensjonering av fysiske sikringstiltak mot steinsprang. Vurderingen er basert på sensitivitesanalysen og den totale brukeropplevelsen til modellverktøyet, hvor det er kommet frem til følgende vurdering for de enkelte modellene:

- **RF3D** oppleves som robust og best egnet til bruk for dimensjonering av sikringstiltak. RF3D er den modellen som er mest stabil i resultatene og det er ingen simulering som skiller seg markant ut. Justering av bakkeruhet er derimot ikke testet og vurdert, og modellen er svært sensitiv for denne parameteren. Bruk av "rapid automatic simulation" (RAS) i RF3D anbefales ikke å bruke for dimensjonering av fysiske sikringstiltak. RF3D produserer generelt lavere spranghøyder enn RF og RR noe man bør være oppmerksom på, dette kan forklares med at modellen måler spranghøyder i normalretning mot bakken og ikke vertikalt slik som RR og RF. RF3D har gode kalibreringsmuligheter, få analysemuligheter (men de funksjoner som tilbys er godt egnet til vurdering av sikringsstiltak), og den billigste lisensprisen.
- **RR** oppleves som robust, men mindre egnet til bruk for dimensjonering av sikringstiltak. RR har flere muligheter for analyse av resultat, men er den modellen med minst kalibreringsmuligheter og med den dyreste lisensprisen. Man bør være oppmerksom på at modellen produserer generelt høyere spranghøyder enn RF og RF3D. Simuleringer med sfærisk blokk i RR anbefales ikke å bruke, da denne skiller seg markant ut med ekstremt lave verdier.
- **RF** oppleves som mindre robust og mindre egnet til bruk for dimensjonering av sikringstiltak. Den produserte noe ustabile resultater ved justering av bakketype og er svært sensitiv for endringer i helningsgeometrien/terrenget. Modellen har mange innstillinger og parametre noe som krever utstrakt kunnskap og erfaring med bruk av modellen. Modellen har flere analysemuligheter av resultat som er spesifikt rettet mot dimensjonering av sikringstiltak, og tilbyr en relativt billig lisenspris. Når det gjelder valg av analysemodeller i RF (lump mass vs rigid body) kreves flere simuleringer for å identifisere systematiske forskjeller på analysemodellene og trekke endelige konklusjoner.

Alt dette demonstrerer også viktigheten av at simuleringsverktøy alltid bør brukes i tillegg til feltobservasjoner, historiske opplysninger, skredfaglig kunnskap og skjønn, og at fagpersonens rolle er avgjørende i tolkning av resultater og dimensjonering av sikringstiltak.

Referanseliste

- Agliardi, F. & Crosta, G. B. (2003). High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40, 455-471. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(03\)00021-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1365-1609(03)00021-2)
- Ansvar for trafikksikkerhetsarbeid. (2022, § 40 a). *Lov om vegtrafikk. Ansvar for trafikksikkerhetsarbeid, § 40 a*. <https://lovdata.no/lov/1965-06-18-4/§40a>
- Asplin, L. (2021). *Rockfall and snow avalanche impact dynamics for road protection design at Svarthola, Senja* [The Arctic University of Norway.].
- Asteriou, P., Saroglou, H. & Tsiambaos, G. (2012). Geotechnical and kinematic parameters affecting the coefficients of restitution for rock fall analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 54, 103-113. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.05.029>
- Babiker, A. F. A., Smith, C. C., Gilbert, M. & Ashby, J. P. (2014). Non-associative limit analysis of the toppling-sliding failure of rock slopes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 71, 1-11. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.06.008>
- Bar, N., Nicoll, S. & Pothitos, F. (2016, 6–8 September). *Rock fall trajectory field testing, model simulations and considerations for steep slope design in hard rock*. APSSIM 2016: Proceedings of the First Asia Pacific Slope Stability in Mining Conference, Brisbane. https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1604_29_Bar
- Berger, F. & Dorren, L. (2006). *Objective comparison of rockfall models using real size experimental data* [Extrait de document]. Universal Academy Press, Inc. <https://hal.inrae.fr/hal-02588246>
- Bigot, C., Dorren, L. K. A. & Berger, F. (2009). Quantifying the protective function of a forest against rockfall for past, present and future scenarios using two modelling approaches. *Natural Hazards*, 49(1), 99-111. <https://doi.org/10.1007/s11069-008-9280-0>
- Bjørddal, H. (2011). *Sikring av veger mot steinskred* (32). Statens vegvesen. Veidirektoratet. <http://hdl.handle.net/11250/2582754>
- Bøe, M. V. (2022). *energi i Store norske leksikon på snl.no*. Hentet 13.april 2023 fra <https://snl.no/energi>
- Bryhni, I. (2020). *berggrunn i Store norske leksikon på snl.no*. Hentet april 2023 fra <https://snl.no/berggrunn>
- Byggegrunn miljøforhold mv. (2022, § 28-1). *Plan- og bygningsloven*. <https://lovdata.no/lov/2008-06-27-71/§28-1>
- C2ROP. (2020). *National C2ROP Project. Recommandations pour la conception, le suivi de réalisation et l'exploitation des dispositifs de protection par merlons pare-blocs. Guide technique. (EN: Recommendations for the design, implementation follow-up and operation of protection by block barriers. Technical guide.)* Hentet oktober 2022 fra <https://www.cerema.fr/fr/actualites/recommandations-conception-suivi-realisation-exploitation>
- Chau, K. T., Wong, R. H. C. & Wu, J. J. (2002). Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(1), 69-77. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(02\)00016-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00016-3)
- Cross, R. (1999). The bounce of a ball. *American Journal of Physics*, 67(3), 222-227. <https://doi.org/10.1119/1.19229>

- Crosta, G. B., Agliardi, F., Frattini, P. & Lari, S. (2015). Key Issues in Rock Fall Modeling, Hazard and Risk Assessment for Rockfall Protection. I G. Lollino, D. Giordan, G. B. Crosta, J. Corominas, R. Azzam, J. Wasowski & N. Sciarra, *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 2* Cham.
- Direktoratet for byggkvalitet. (2021). *Byggteknisk forskrift (TEK17) med veiledning, § 7-3. Sikkerhet mot skred*. <https://dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/7/7-3/>
- Domaas, U. (1995). *Natural rockfalls. Description and calculations* (585910-3). Norges geotekniske institutt.
- Domaas, U. & Grimstad, E. (2014). *SKRED. Skredfare og sikringstiltak, praktiske erfaringer og teoretiske prinsipper. Kapittel 3 Fjell- og steinskred*. NGI Universitetsforlag.
- Dorren, L. & Kuhne, R. (2016). Comparing the 3D rockfall simulation models Rockyfor3D and RAMMS::ROCKFALL at a case study site in Switzerland.
- Dorren, L. K. & Berger, F. (2006). Stem breakage of trees and energy dissipation during rockfall impacts. *Tree Physiol*, 26(1), 63-71. <https://doi.org/10.1093/treephys/26.1.63>
- Dorren, L. K. A. (2003). A review of rockfall mechanics and modelling approaches. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 27(1), 69-87. <https://doi.org/10.1191/0309133303pp359ra>
- Dorren, L. K. A. (2016). *Rockyfor3D (v5.2) revealed. Transparent description of the complete 3D rockfall model* [32]. EcorisQ paper, (www.ecorisq.org). https://www.ecorisq.org/docs/Rockyfor3D_v5_2_EN.pdf
- Dorren, L. K. A., Berger, F. & Putters, U. S. (2006). Real-size experiments and 3-D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 6(1), 145-153. <https://doi.org/10.5194/nhess-6-145-2006>
- Elvik, R. (2022). *Trafikksikkerhetshåndboken. Kap 2.5 Sikring av veier mot skred og drivsnø*. Transportøkonomisk institutt. Stiftelsen Norsk senter for samferdselsforskning. Hentet februar 2023 fra <https://www.tshandbok.no/del-2/2-vegvedlikehold/doc643/>
- EOTA. (2018). *EAD 340059-00.0106. Falling rock protection kits*.
- Esri Inc. (2021). *ArcGIS Pro 2.9.0*. <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/overview>
- Evans, S. G. & Hungr, O. (1993). The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 30, 620-636.
- Fanos, A. M. & Pradhan, B. (2018). Laser Scanning Systems and Techniques in Rockfall Source Identification and Risk Assessment: A Critical Review. *Earth Systems and Environment*, 2(2), 163-182. <https://doi.org/10.1007/s41748-018-0046-x>
- Geobrudd. (2023). *Geobrudd's History på geobrudd.com*. Hentet 14. april 2023 fra <https://www.geobrudd.com/en/History-44557,7873.html>
- Getzner, M., Gutheil-Knopp-Kirchwald, G., Kreimer, E., Kirchmeir, H. & Huber, M. (2017). Gravitational natural hazards: Valuing the protective function of Alpine forests. *Forest Policy and Economics*, 80, 150-159. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.forpol.2017.03.015>
- Glover, J. (2015). Rock-shape and its role in rockfall dynamics.
- Grøn, Ø. (2019). *treghetsmoment i Store norske leksikon på snl.no*. Hentet 13. april 2023 fra <https://snl.no/treghetsmoment>
- Grøn, Ø. (2021a). *kinetisk energi i Store norske leksikon på snl.no*. Hentet 13. april 2023 fra https://snl.no/kinetisk_energi
- Grøn, Ø. (2021b). *Newtons lover i Store norske leksikon på snl.no*. https://snl.no/Newtons_lover
- Gundersen, D. (2020). *dynamisk i Store norske leksikon på snl.no*. Hentet 2. mai 2023 fra <https://snl.no/dynamisk>

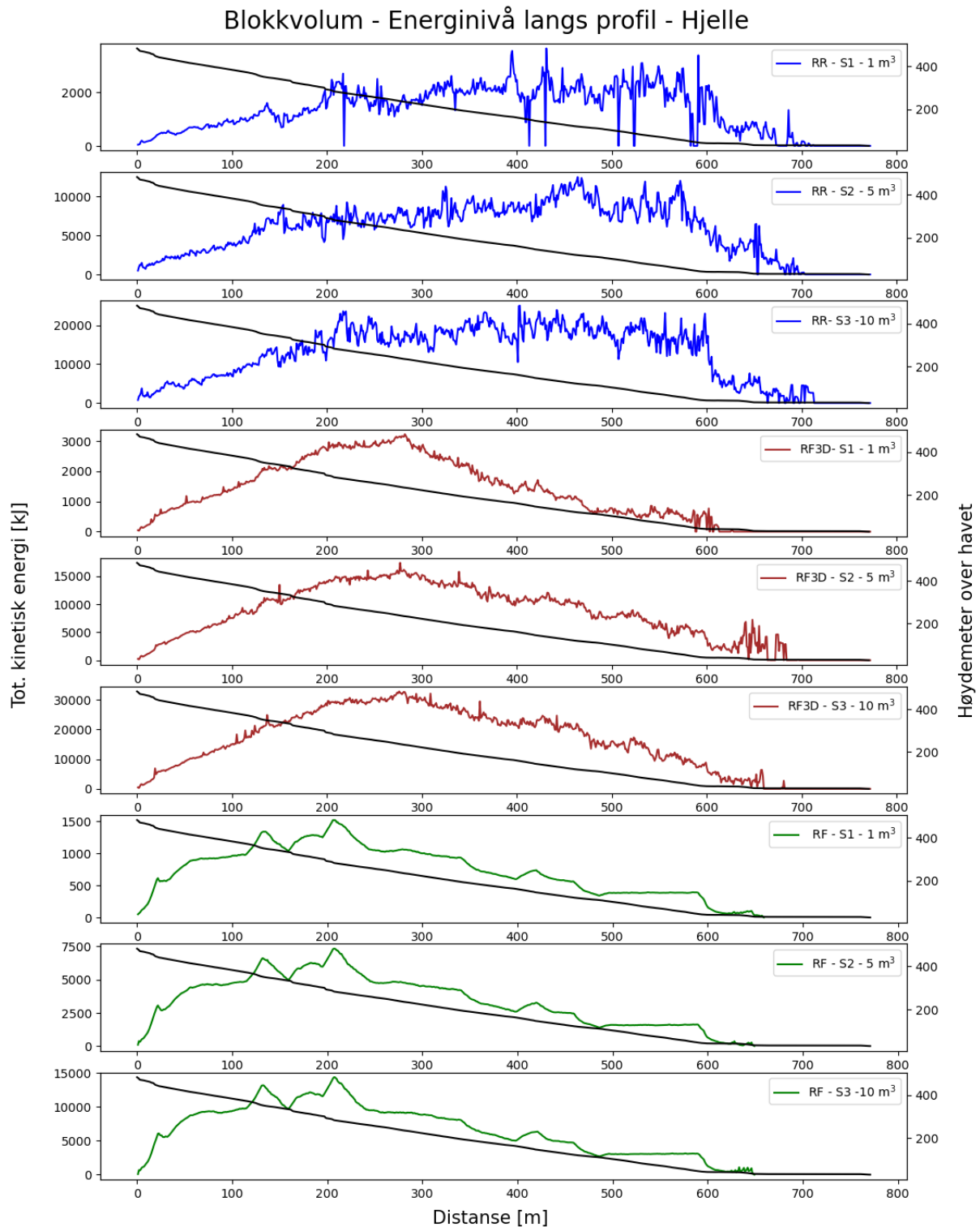
- Hardeng, J. (2023). *skred fra fast fjell i Store norske leksikon på snl.no*. Hentet april 2023 fra https://snl.no/skred_fra_fast_fjell
- Hefre, H. & Mo, K. (2020). *Uttesting av eksisterende metodikk for modellering av steinsprang* (24/2020). Norges vassdrags- og energidirektorat.
- Hind, H. (2018). *Comparison of 3D and 2D rockfall models. Considering terrain model quality effect on respective model performances* [Norges arktiske universitet (UiT)]. <https://hdl.handle.net/10037/12890>
- Hofstad, K. (2022). *impuls - fysikk i Store norske leksikon på snl.no*. https://snl.no/impuls_-_fysikk
- Hungr, O., Leroueil, S. & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167-194. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>
- Illeditsch, M. & Preh, A. (2020). The concept of design block size – A critical review of ONR 24810 “Technical Protection against Rockfall”. *Geomechanics and Tunneling*, 13(6), 604-611. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/geot.202000021>
- Jørstad, F. (1979). *Veiledning ved undersøkelser av og sikring mot steinskred* (NGI Rapport 54705-1). Norges Geotekniske Institutt (NGI).
- Kartverket. (2022). *Høgdedata og djupnedata* [Data hentet fra høydedata.no]. Høydedata.no. <https://www.kartverket.no/api-og-data/terrengdata>
- Kirkby, M. J. & Statham, I. (1975). Surface Stone Movement and Scree Formation. *Journal of Geology*, 83, 349-362. <https://doi.org/10.1086/628097>
- Labiouse, V. & Heidenreich, B. (2009). Half-scale experimental study of rockfall impacts on sandy slopes. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9(6), 1981-1993. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1981-2009>
- Li, L. & Lan, H. (2015). Probabilistic modeling of rockfall trajectories: a review. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74(4), 1163-1176. <https://doi.org/10.1007/s10064-015-0718-9>
- MBIE. (2017). *ROCKFALL: Design considerations for passive protection structures* (ISBN: 978-0-947493-62-0). Ministry of Business, Innovation & Employment (MBIE)
- Morken, E. (2021). *Performance of Three Rockfall Models Tested at Historic Rockfall Sites in Western Norway* [University of Oslo].
- Nagendran, S. K. & Ismail, M. A. M. (2019). Analysis of Rockfall Hazards Based on the Effect of Rock Size and Shape. *International Journal of Civil Engineering*, 17(12), 1919-1929. <https://doi.org/10.1007/s40999-019-00418-1>
- NGI. (2017a). *Hjelle, Stryn. Faresonekartlegging av utvalgte områder* (Dokumentnr. 20160570-01-R). <https://www.nve.no/naturfare/utredning-av-naturfare/flom-og-skredfare-i-din-kommune/faresonekart-kommuner/vestland/stryn-kommune/>
- NGI. (2017b). *Skredfarekartlegging i Stryn kommune*. (NVE ekstern rapport nr. 45-2017). NVE. <https://www.nve.no/naturfare/utredning-av-naturfare/flom-og-skredfare-i-din-kommune/faresonekart-kommuner/vestland/stryn-kommune/>
- NGU. (2022). *Datasekk og nedlasting*. Hentet oktober 2022 fra <http://geo.ngu.no/download/order?lang=no>
- Noël, F., Cloutier, C., Jaboyedoff, M. & Locat, J. (2021). Impact-Detection Algorithm That Uses Point Clouds as Topographic Inputs for 3D Rockfall Simulations. *Geosciences*, 11(5), 188. <https://www.mdpi.com/2076-3263/11/5/188>
- NVE. (2020). *Veileder for utredning av skred i bratt terreng*. Hentet september 2022 fra <https://veileder-skredfareutredning-bratt-terreng.nve.no/>
- NVE. (2022). *NVE Atlas - skredhendelser*. NVE. Hentet oktober 2022 fra <https://atlas.nve.no/Html5Viewer/index.html?viewer=nveatlas#>
- NVE. (2023). *Dette er NVE på nve.no*. <https://nve.no/om-nve/dette-er-nve/>

- NVE. (2023, ikke publisert). *Sikringshåndboka - Skred i bratt terreng* [Håndbok]. NVE.
<https://sikringshandboka.nve.no/>
- Olje- og Energidepartementet. (2012). *Meld. St. 15 (2011–2012). Hvordan leve med farene - om flom og skred* <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/meld-st-15-20112012/id676526/?ch=1>
- Ormestad, H. (2019). *støt - fysikk i Store norske leksikon på snl.no*. Hentet 13. april 2023 fra [https://snl.no/st%C3%B8t - fysikk](https://snl.no/st%C3%B8t-fysikk)
- Ormestad, H. (2023). *friksjon i Store norske leksikon på snl.no*. Hentet 20. mars 2023 fra <https://snl.no/friksjon>
- ØSI. (2021). *ONR 24810: Technical protection against rockfall – Terms and definitions, effects of actions, design, monitoring and maintenance*. Østerrikes Standard Institutt.
- Øystese, A. & Åsvold, H. P. (2009). Steinsprang RV 617 HP1 - 4035 Måløy - Raudeberg. <https://www.nve.no/naturfare/utredning-av-naturfare/flom-og-skredfare-i-din-kommune/faresonekart-kommuner/vestland/stryn-kommune/>
- Petje, U., Mikoš, M. & Majes, B. (2006). Motion of rock masses on slopes. *Geologija*, 49, 393-408.
- Planlegging, a. o. v. a. v. (2021, § 12). *Lov om vegar. Kap. III. Planlegging, anlegg og vedlikehold av veg § 12*. <https://lovdata.no/lov/1963-06-21-23/§12>
- RAMMS. (2022). *RAMMS::ROCKFALL User Manual v1.7*.
<https://www.slf.ch/en/index.html>.
[https://ramms.slf.ch/ramms/downloads/RAMMS ROCK Manual.pdf](https://ramms.slf.ch/ramms/downloads/RAMMS_ROCK_Manual.pdf)
- Ritchie, A. M. (1963). Evaluation of rockfall and its control. *Highway research record*, (17).
- Rocscience. (2023a). *Advanced Friction and Viscoplastic Ground Drag*.
[https://www.rocscience.com/help/rockfall/tutorials/tutorials-overview/10-advanced-friction-and-viscoplastic-ground-drag#:~:text=This%20creates%20a%20%20E2%80%9Cscar%E2%80%9D%20in%20the%20ground%20and,by%20contact%20of%20rock%20and%20ground.%202.0%20M](https://www.rocscience.com/help/rockfall/tutorials/tutorials-overview/10-advanced-friction-and-viscoplastic-ground-drag#:~:text=This%20creates%20a%20%20E2%80%9Cscar%E2%80%9D%20in%20the%20ground%20and,by%20contact%20of%20rock%20and%20ground.%202.0%20Model)
<odel>
- Rocscience. (2023b). *Analysis method*.
<https://www.rocscience.com/help/rockfall/documentation/project-settings/general-settings/analysis-method>
- Rocscience. (2023c). *Barrier Sensitivity Analysis*.
<https://www.rocscience.com/help/rockfall/tutorials/tutorials-overview/7-barrier-sensitivity-analysis>
- Rocscience. (2023d). *Coefficient of Restitution*.
<https://www.rocscience.com/help/rockfall/documentation/slope/materials/coefficient-of-restitution#page-content-2>
- Rocscience. (2023e). *Documentation and Theory Overview*.
<https://www.rocscience.com/help/rockfall/overview>
- Rocscience. (2023f). *Dynamic Friction and Rolling Resistance*.
<https://www.rocscience.com/help/rockfall/documentation/slope/materials/dynamic-friction-and-rolling-resistance>
- Rocscience. (2023g). *Quick Start*. <https://www.rocscience.com/help/rockfall/tutorials/tutorials-overview/1-quick-start>
- Rocscience. (2023h). *RocFall Analysis Overview*.
<https://www.rocscience.com/help/rockfall/documentation/program-overview/rockfall-overview>
- Rocscience. (2023i). *Scaling Functions*.
<https://www.rocscience.com/help/rockfall/documentation/project-settings/scaling-functions>

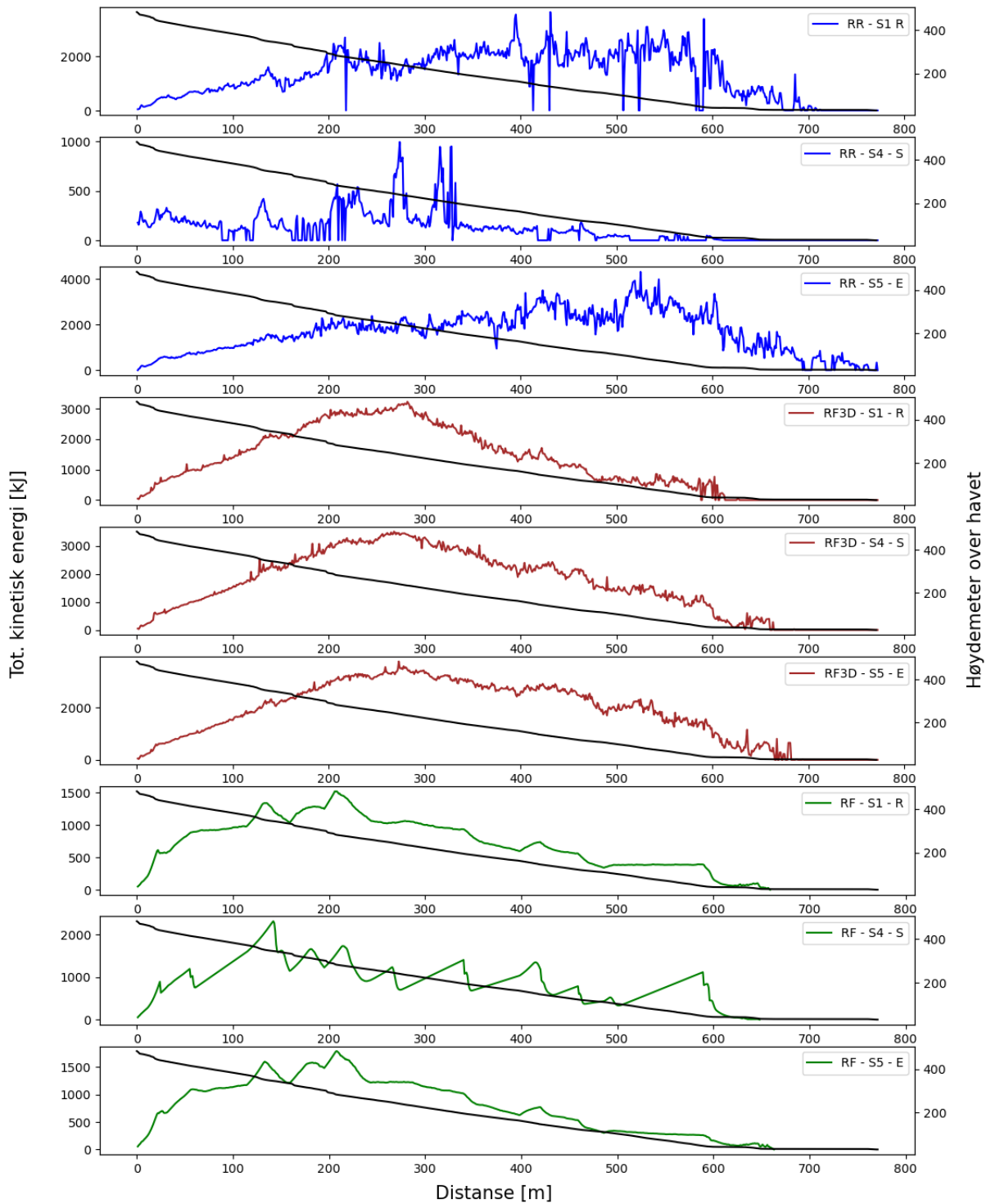
- Rocscience. (2023j). *Simplifying the Slope Boundary*.
<https://www.rocscience.com/help/rocfall/documentation/slope/simplifying-the-slope-boundary>
- Rocscience. (2023k). *Technical Specifications*.
<https://www.rocscience.com/help/rocfall/overview/technical-specifications#page-content-1>
- Samferdselsdepartementet. (2021). *Meld. St. 20 (2020–2021) Nasjonal transportplan 2022–2033* <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/meld.-st.-20-20202021/id2839503/>
- Schafer, R. W. (2011). What Is a Savitzky-Golay Filter? [Lecture Notes]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 28(4), 111-117. <https://doi.org/10.1109/MSP.2011.941097>
- Sikkerhet mot skred. (2022, § 7-3). *Byggteknisk forskrift (TEK17)*.
<https://lovdata.no/forskrift/2017-06-19-840/§7-3>
- SVV. (2013). *Fv 617, Hp 2, km 3,770 – km 4,400. Steinsprang Måløy – Raudeberg. Notat etter synfaring. 36040 – 460*.
<https://vegvesen.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=6d7d9d02d6fb4b70bfdfa955bdb3602a>
- SVV. (2014a). *Fv 617, Hp 2, ca km 4,100. Steinsprang Måløy – Raudeberg 08.09.14. Notat etter synfaring. 36040-460*.
<https://vegvesen.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=6d7d9d02d6fb4b70bfdfa955bdb3602a>
- SVV. (2014b). *Fv 617. Hp 2, ca km 4,00-4,400. Måløy-Raudeberg. Vurdering av fjellpartier og sikringstiltak. 36040-460. Statens Veivesen*.
<https://vegvesen.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=6d7d9d02d6fb4b70bfdfa955bdb3602a>
- SVV. (2019). *Registrerte skred og nedfall på veg, hele Norge, perioden 2000-2019*.
<https://www.vegvesen.no/globalassets/fag/teknologi/skred-og-nedfall-pa-veg-registrert-per-2019.pdf>
- SVV. (2020). *Skred. Erfaringsrapport om oppsett av fanggjerdar (1058-SKRED-01. Intern rapport som ikke er publisert.)*.
- SVV. (2022). *Håndbok N200 Vegbygging, kapittel 1.7 Sikkerhet mot skred*.
<https://viewers.vegnorm.vegvesen.no/product/859942/nb>
- SWECO. (2017). *Skredfarekartlegging i Vågsøy kommune (NVE ekstern rapport nr. 36-2017)*. <https://www.nve.no/naturfare/utredning-av-naturfare/flom-og-skredfare-i-din-kommune/faresonekart-kommuner/vestland/kinn-kommune/>
- Turner, A. K. & Schuster, R. L. (2012). *ROCKFALL Characterization and control*. Transportation Research Board.
- Vegstyremaktene. (2019, § 9 og § 10). *Lov om vegar. Kap. II. Vegstyremaktene § 9 og § 10*.
<https://lovdata.no/lov/1963-06-21-23/§10>
- Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier, F., Dorren, L. K. A., Gerber, W. & Jaboyedoff, M. (2011). Rockfall characterisation and structural protection – a review. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11(9), 2617-2651.
<https://doi.org/10.5194/nhess-11-2617-2011>

Vedlegg

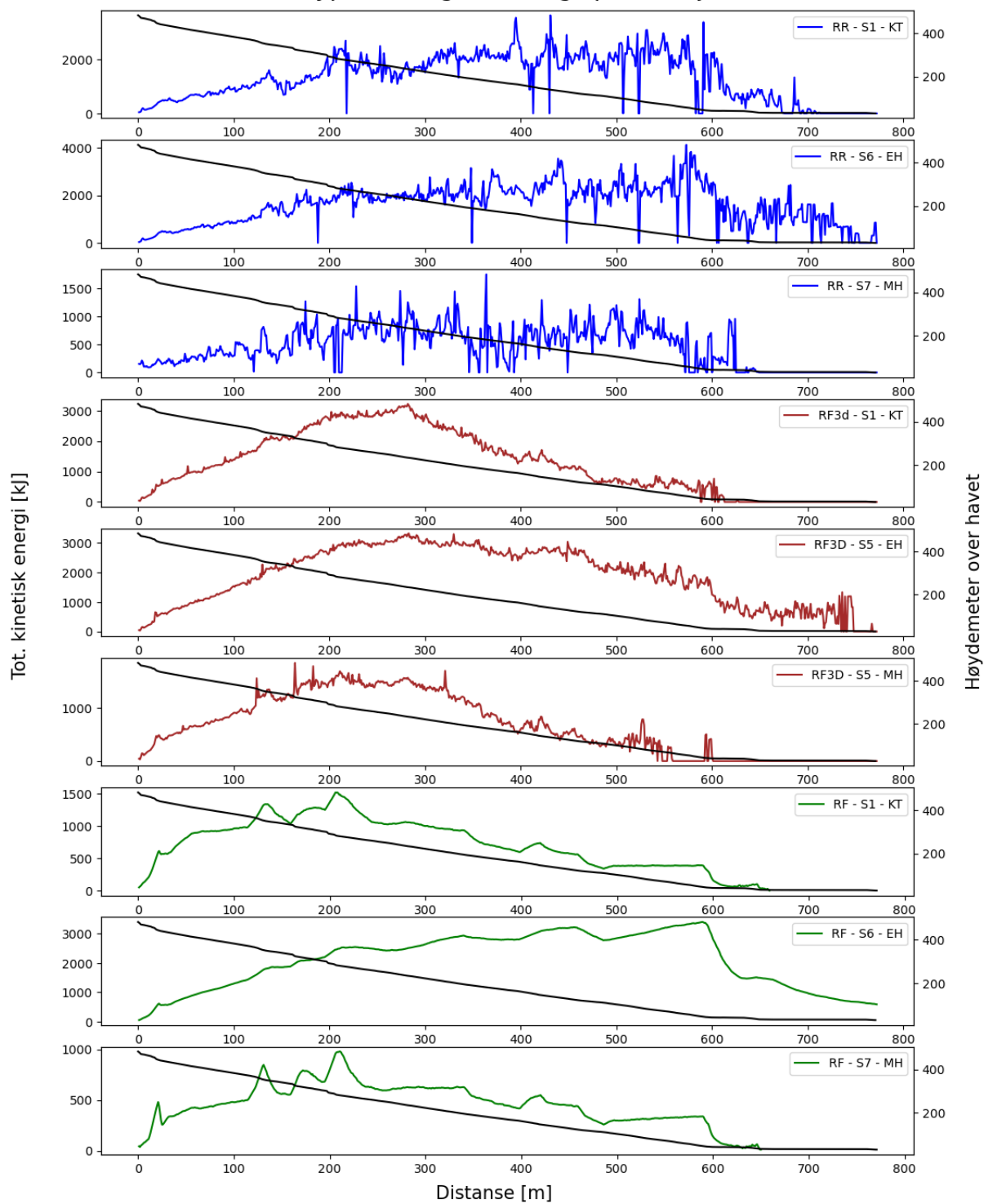
Vedlegg A: Rådata av gjennomsnittlige total energi langs profil for alle simuleringer i Hjelle



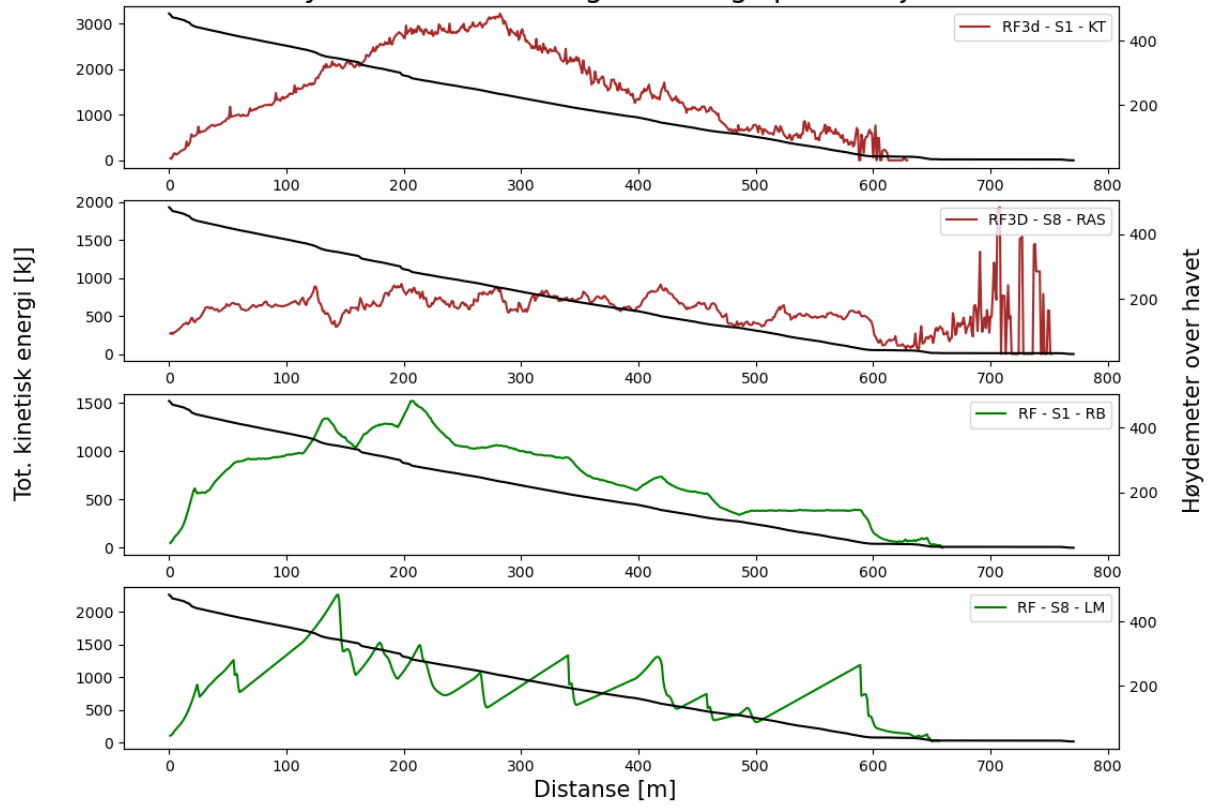
Blokkform - Energinivå langs profil - Hjelle



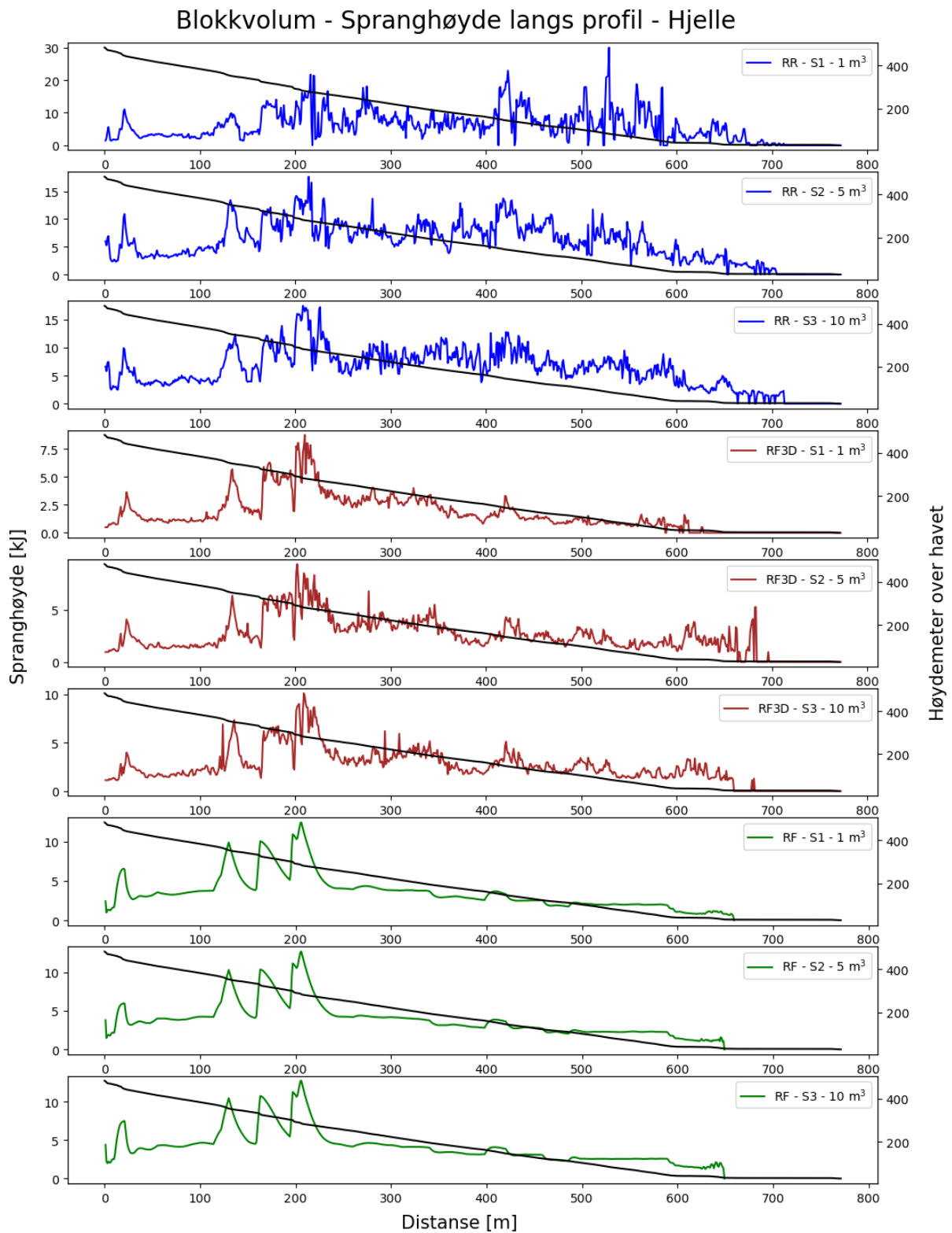
Bakketype - Energinivå langs profil - Hjelle



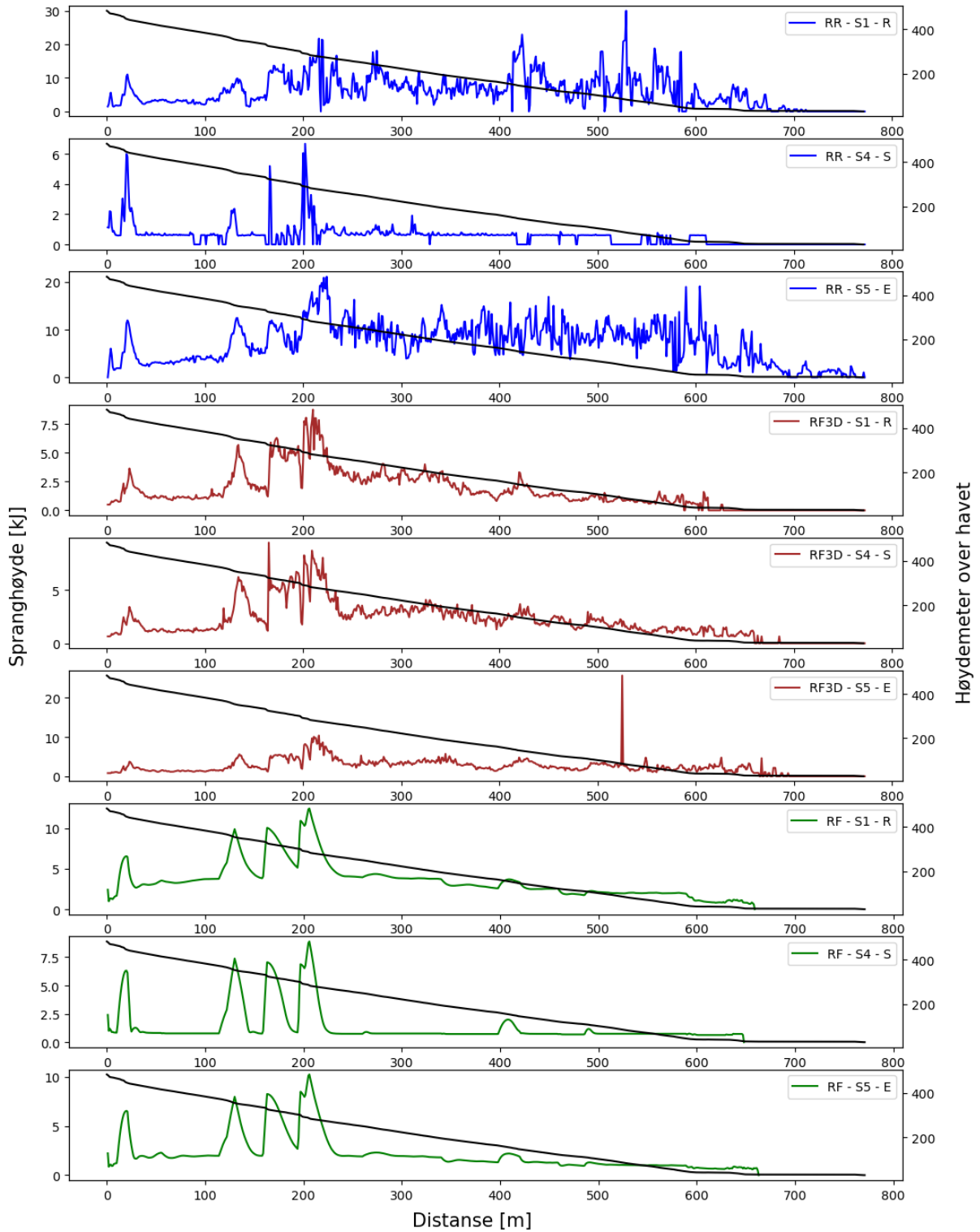
Analysemodeller - Energinivå langs profil - Hjelle



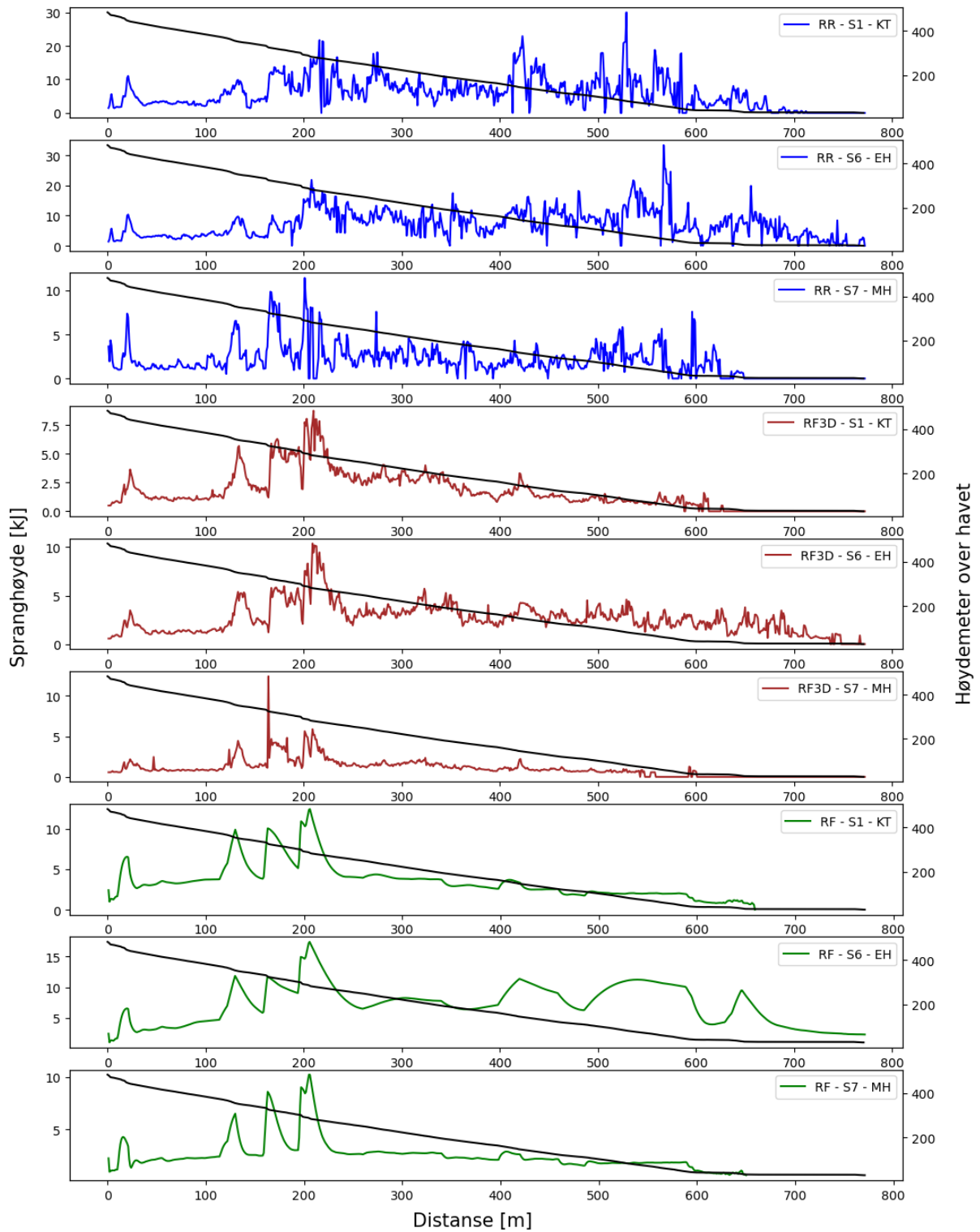
Vedlegg B: Rådata av gjennomsnittlig spranghøyde langs profil for alle simuleringer i Hjelle



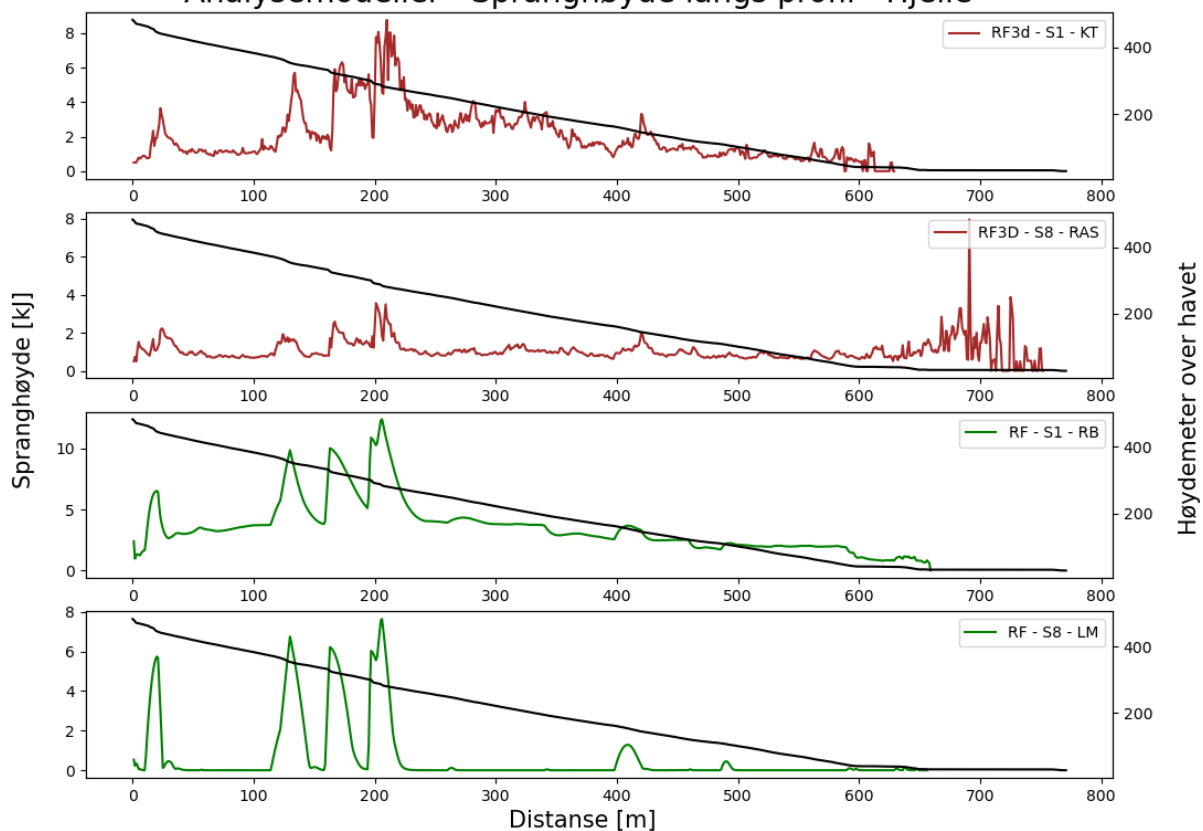
Blokkform - Spranghøyde langs profil - Hjelle



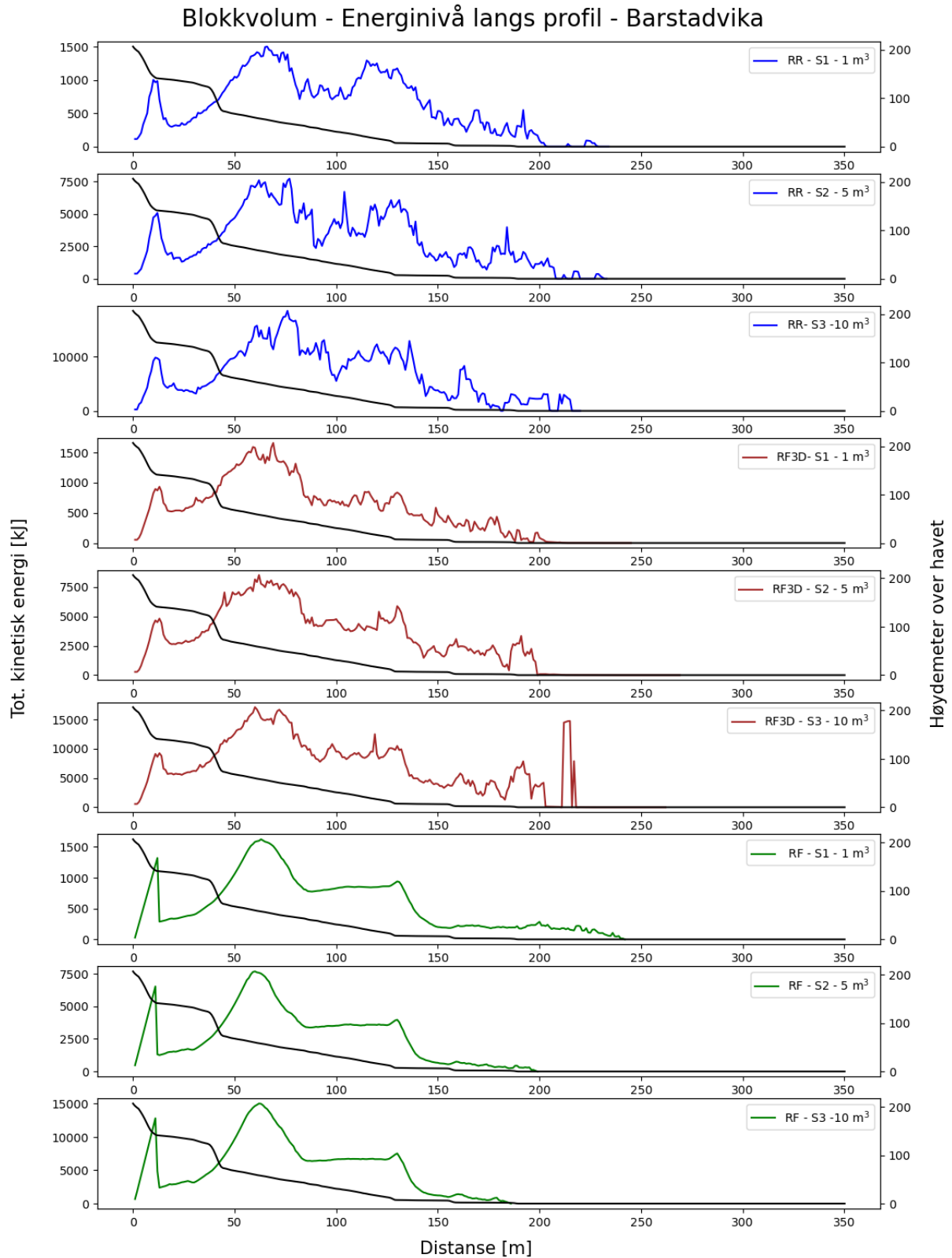
Bakketype - Spranghøyde langs profil - Hjelle



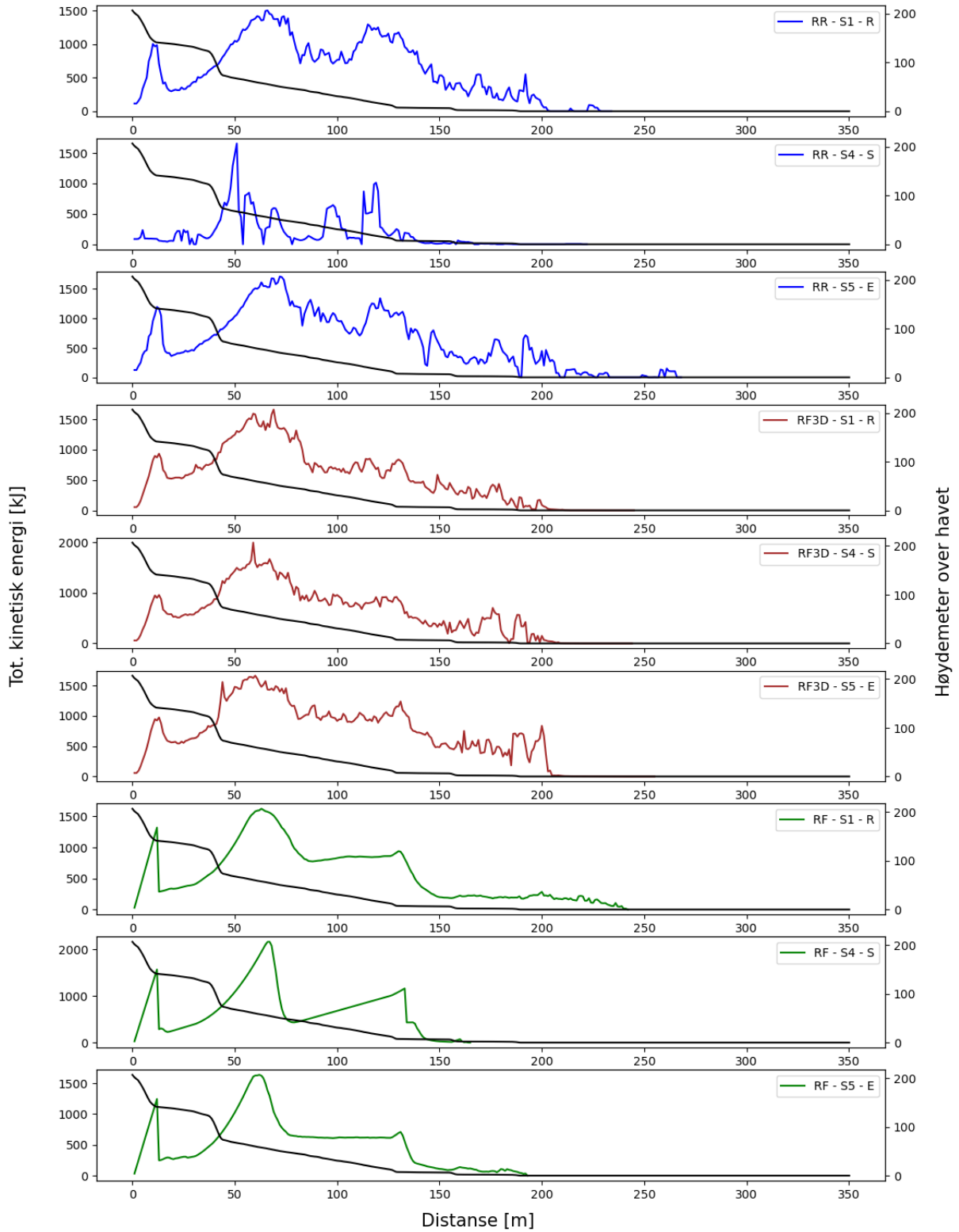
Analysemodeller - Spranghøyde langs profil - Hjelle



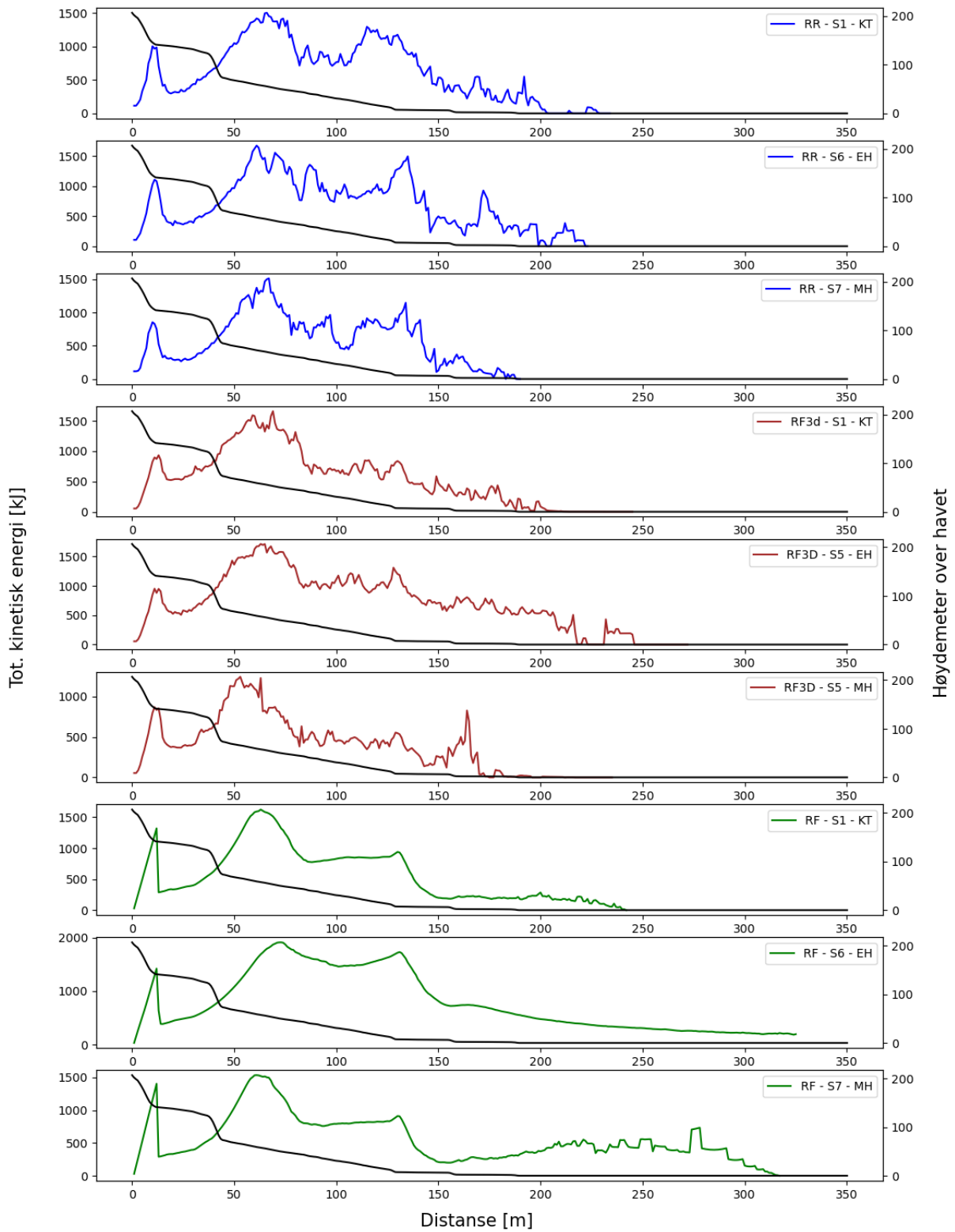
Vedlegg C: Rådata av gjennomsnittlig total energi langs profil for alle simuleringer i Barstadvika



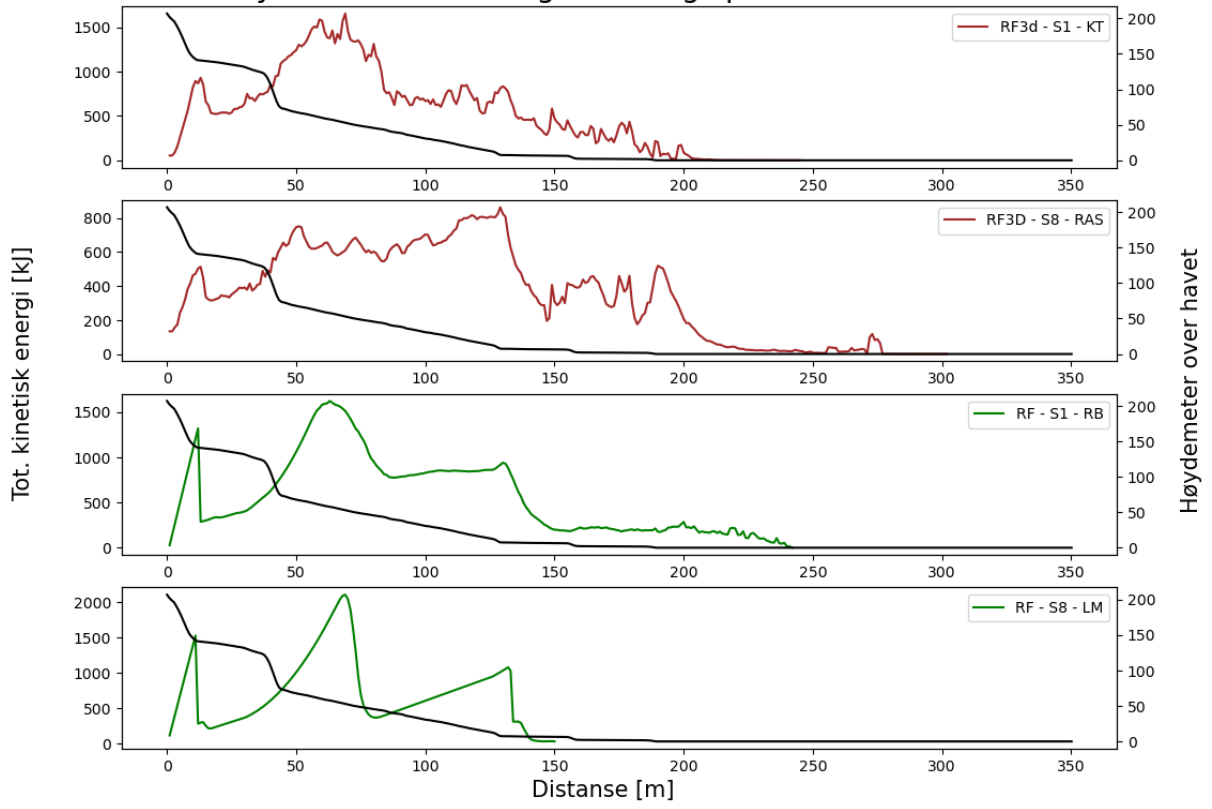
Blokkform - Energinivå langs profil - Barstadvika



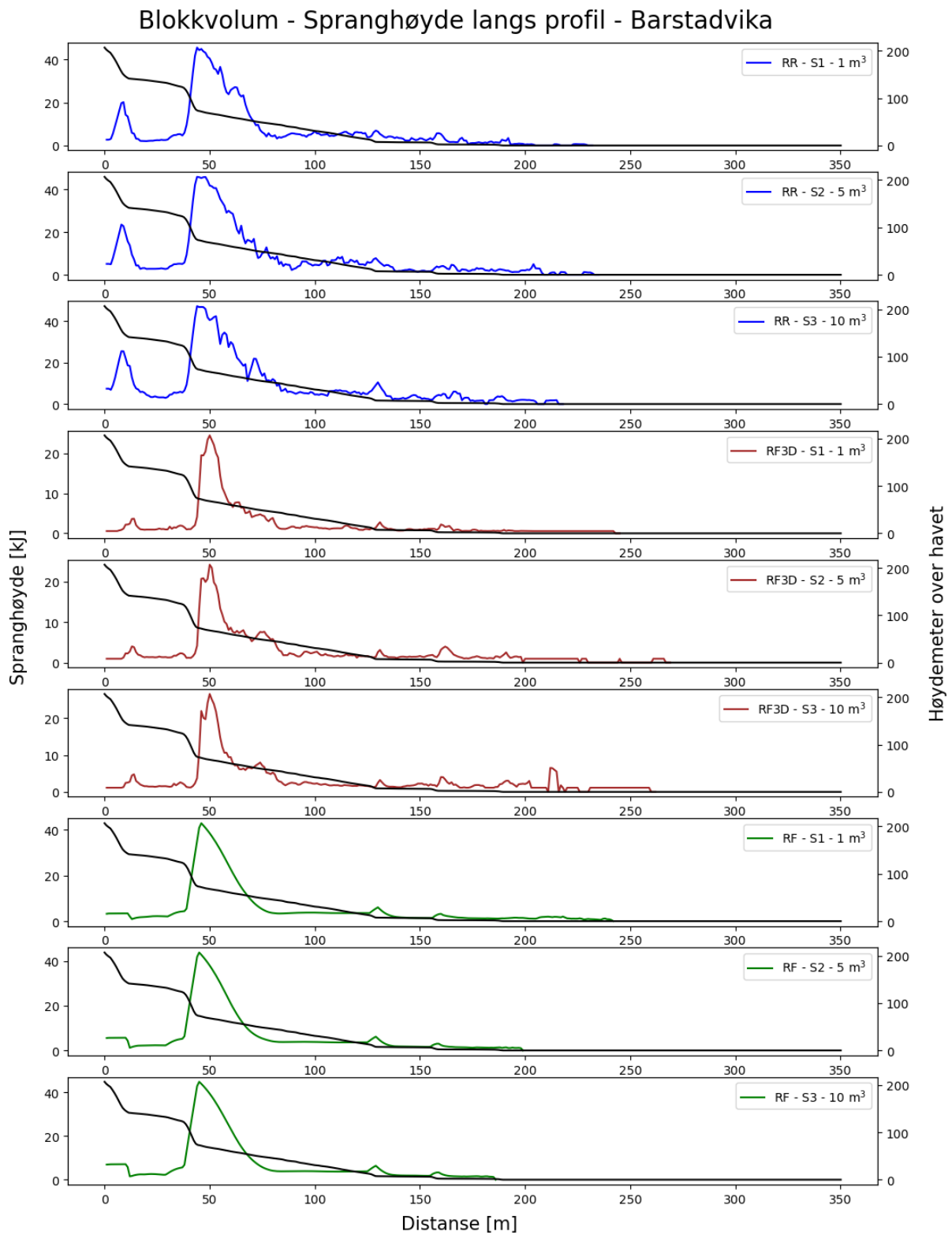
Bakke type - Energinivå langs profil - Barstadvika



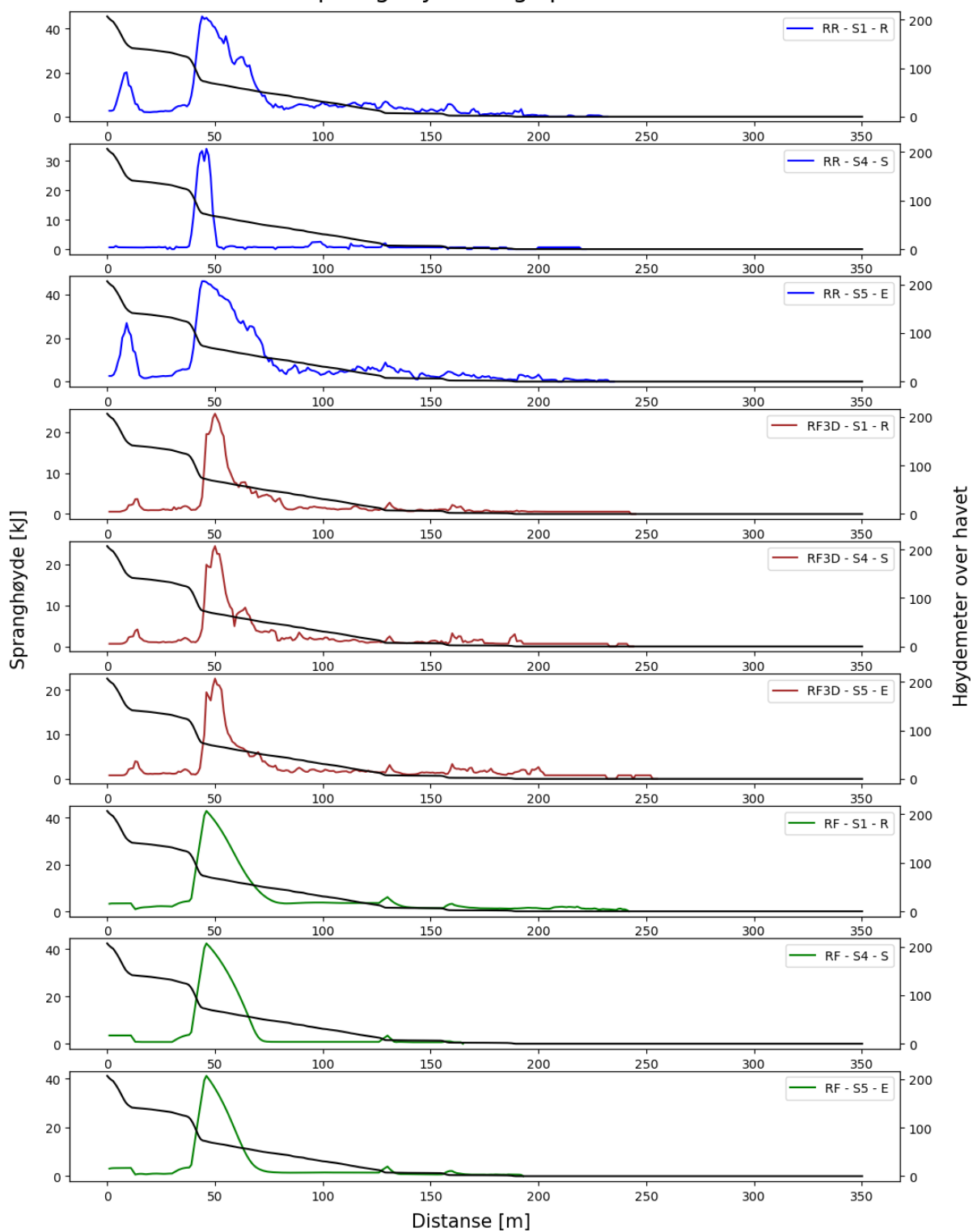
Analysemodeller - Energinivå langs profil - Barstadvika



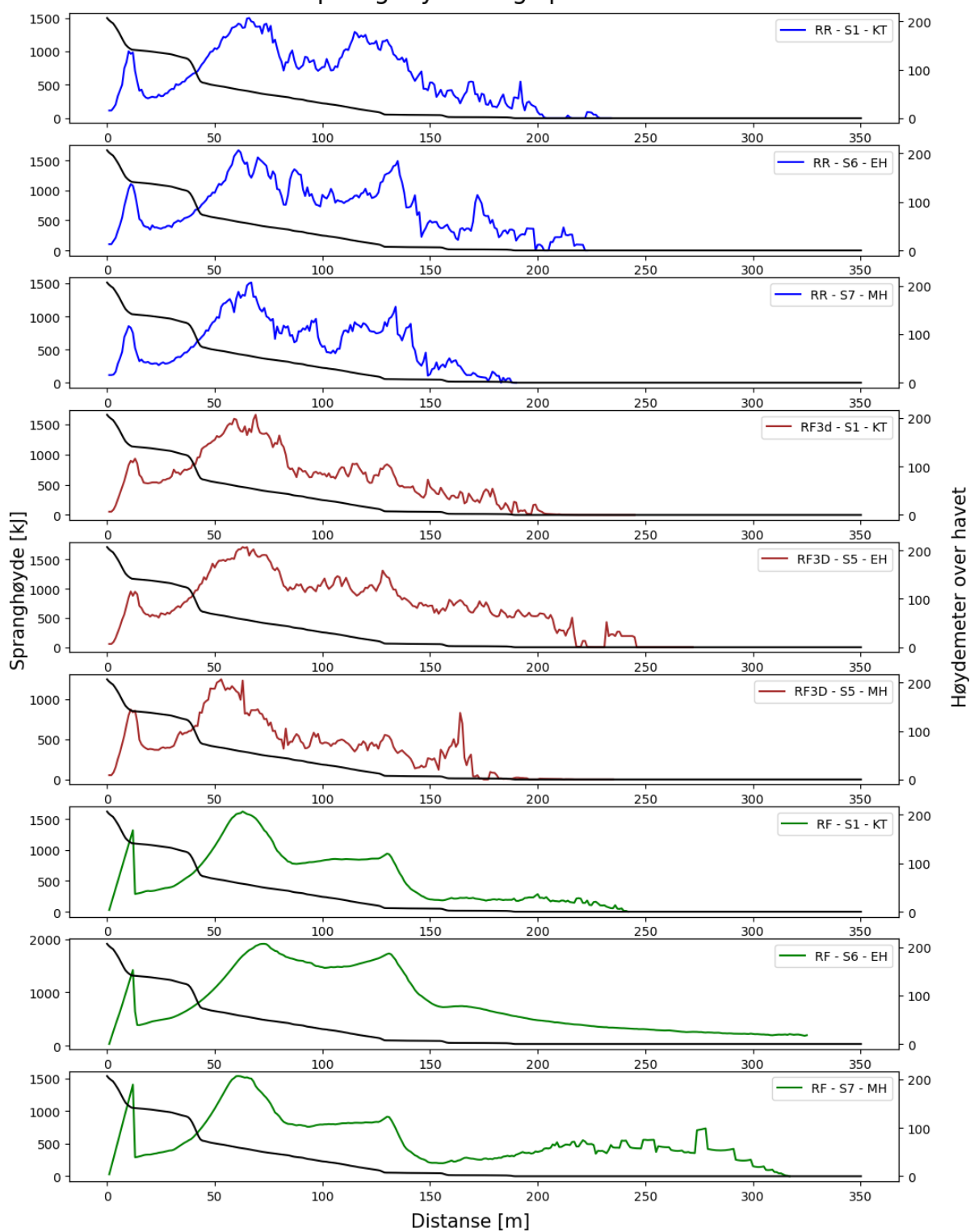
Vedlegg D: Rådata av gjennomsnittlig spranghøyde langs profil for alle simuleringer i Barstadvika



Blokkform - Spranghøyde langs profil - Barstadvika



Blokkform - Spranghøyde langs profil - Barstadvika



Analysemodeller - Spranghøyde langs profil - Barstadvika

