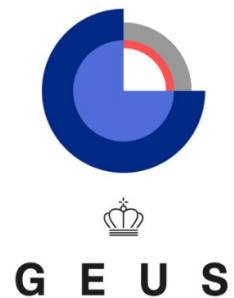


Sammenfatning af Undersøgelse af risiko for alvorlige fjeldskred i Grønland

De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland

4. oktober 2022



Indholdsfortegnelse

Indledning	3
Sammendrag	4
Leverancer.....	9
Baggrund	10
Screeningsundersøgelsen	10
Fjeldskred i Grønland	10
Metoder og data	11
Fjeldpartier med høj risiko	14
Karrat 3.....	14
Kigarsima.....	16
Anbefaling	18
Fjeldpartier med moderat risiko	19
Paatuut Øst	19
Illorsuaasaq	20
Qaarusuup Qaqqaa	21
Anbefaling	22
Fjeldpartier med lav risiko	23
Karrat 1 og 2.....	23
Øvrige lokaliteter	24
Uummannaqs fjordsystem og Vaigat.....	25
Uummannaqs fjordsystem.....	25
Vaigat	25
Seismologi	27
Klimamodellering	29
Vurdering af muligheder for monitoring og varsling	31
Overførsel af teknologi og kompetence til Grønland	31
Konklusioner	32
Referencer.....	34

Indledning

Efter de tragiske konsekvenser af fjeldskredet og tsunamien i Karrat fjorden den 17. juni 2017 blev projektet "Screeningundersøgelse af risiko for større fjeldskred i Grønland" (Screeningsundersøgelsen) igangsat i august 2017. Dette arbejde afsluttedes ved udgangen af 2018 og identificerede 18 potentielt kritiske lokaliteter på den grønlandske vestkyst.

Anbefalingerne fra afslutningen af screeningundersøgelsen var at igangsætte yderligere undersøgelser af de 18 lokaliteter, hvilket der på baggrund af et kommissorium i løbet af 2019 blev besluttet, og der blev ligeledes sikret bevilling til et 3-årigt projekt med overskriften "Undersøgelse af risiko for alvorlige fjeldskred i Grønland" (Fjeldskredsprojektet). I 2020 blev det planlagte feltarbejde udskudt på grund af Covid-19-situationen, og i den forbindelse blev projektafslutningen udskudt til udgangen af 3. kvartal 2022.

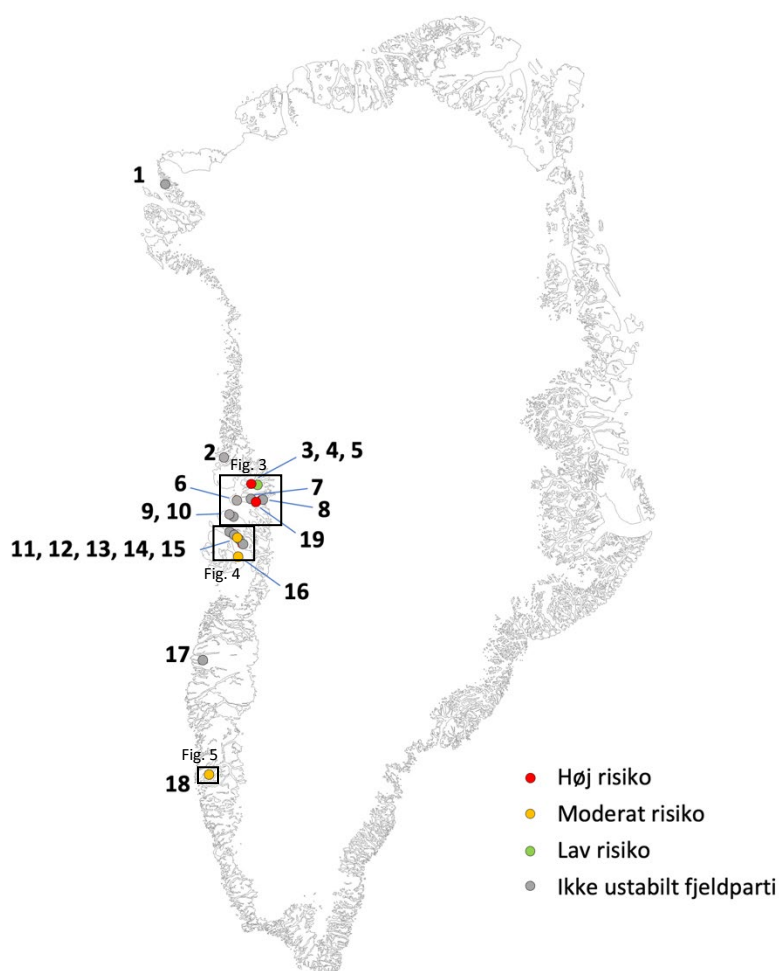
I tillæg til de 18 udpegede lokaliteter blev der i foråret 2022 identificeret et nyt ustabil fjeldparti i det centrale Vestgrønland, kaldet nr. 19 Kigarsima.

Fjeldskredsprojektets endelige aflevering består udover denne "Sammenfatning af Fjeldskredsprojektet" af:

- Opsummering af Fjeldskredsprojektet til Naalakkersuisut og Regeringen
- Faktablade med vurderinger af hver af de 19 undersøgte lokaliteter
- Faktablade for hver af de ni bygder eller byer som kan være udsatte for tsunamier
- GIS-projekt med de data (eller metadata for data), som er indsamlet i projektet
- Tre tekniske rapporter om tsunamimodellering fra Norges Geotekniske Institut
- 12 GEUS Notater om de udførte undersøgelser, risiko for fjeldskred og tsunamibølger i specifikke områder samt muligheder for monitoring og varsling (heraf fem nye notater).

Sammendrag

Fjeldskredsprojektet har ud af de 19 undersøgte lokaliteter vurderet, at syv er ustabile fjeldpartier, hvoraf to er klassificeret med høj risiko (nr. 5 Karrat 3 og nr. 19 Kigarsima), tre med moderat risiko (nr. 14 Paatuut Øst, nr. 16. Illorsuaasaq og nr. 18. Qaarusuup Qaqqaa), og to med lav risiko (nr. 3 Karrat 1 og nr. 4 Karrat 2). De øvrige 12 lokaliteter vurderes ikke at udgøre nogen risiko (Figur 1 og 2). Risikoen forbundet med et ustabil fjeldparti afhænger af sandsynligheden for, at der sker et fjeldskred, og konsekvensen af fjeldskredet i form af potentielt tab af menneskeliv. Vurderingerne beskrevet her ændrer ikke på tidligere vurderinger af risikoen forbundet med de ustabile fjeldpartier.



Figur 1: De 19 lokaliteter i "Undersøgelse af risiko for alvorlige fjeldskred i Grønland".

Høj risiko: Nr. 5 Karrat 3 Nr. 19 Kigarsima	Karrat fjorden Kangerluarsuk fjorden	Anbefaling: Monitering og feltundersøgelser Udvikling af tsunamivarslingssystem
Moderat risiko: Nr. 14 Paatuut Øst Nr. 16 Illorsuaasaq Nr. 18 Qaarusuup Qaqqaa	Nuussuaqs sydkyst Diskos nordkyst Godthåbsfjorden	Anbefaling: Periodisk monitering vha. satellitdata (InSAR og optiske)
Lav risiko: Nr. 3 Karrat 1 Nr. 4 Karrat 2	Karrat fjorden Karrat fjorden	Anbefaling: Ingen yderligere opfølgning
Øvrige lokaliteter: Nr. 1 Tulukkat Nr. 2 Tupersuakassaat Nr. 6 Tinumaneq Nr. 7 Qaarsorsuup Qaqqaa Nr. 8 Taateraats Inaat Nr. 9. Qaarsua Nr. 10 Uingajaarsuaq Nr. 11 Aamaruutissakassak Nr. 12 1952 fjeldskreddets bagvæg Nr. 13 Paatuut Vest Nr. 15 Umiusat	Qaanaaq Svartenhuk Ubekendt Ejland Kangerluarsuk fjorden Kangerluarsuk fjorden Nuussuaqs nordkyst Nuussuaqs nordkyst Nuussuaqs sydkyst Nuussuaqs sydkyst Nuussuaqs sydkyst Nuussuaqs sydkyst	Anbefaling: Ingen yderligere opfølgning
Anbefaling for Uummannaqs fjordsystem og Vaigat: Periodisk screening vha. satellitdata (InSAR og optiske)		

Figur 2: Oversigt over klassificering af de undersøgte lokaliteter samt anbefalinger. Karrat 1 og Karrat 2 udgør ikke nogen risiko for beboede områder, så længe Illorsuit og Nuugaatsiaq er ubeboede, men de kan udgøre en risiko for folk som færdes og opholder sig i området.

Høj risiko

For de to fjeldpartier med høj risiko, Karrat 3 og Kigarsima, der begge er beliggende i Uummannaqs fjordsystem, er der udført detaljerede undersøgelser og tsunamimodelleringer. Opskylshøjder i de beboede områder i Uummannaqs fjordsystem for "worst case" skredscenarier ved maksimalt højvande er opsummeret i Tabel 1 og beskrevet i et faktablad for hver nærliggende by eller bygd. Byen Uummannaq og alle bygderne Qaarsut, Niaqornat, Ukkusissat, Saattut, Ikerasak, Illorsuit og Nuugaatsiaq vil blive berørt af et fjeldskred fra hele Karrat 3. En tsunami genereret af fjeldskred fra Kigarsima vil give høje opskyl i Qaarsut, Niaqornat og Ukkusissat.

For de to fjeldpartier med høj risiko, Karrat 3 og Kigarsima (Figur 3), anbefaler GEUS, at begge fjeldpartier monitoreres og løbende undersøges af skredeksperter i felten, og at der

iværksættes udvikling af et tsunamivarslingssystem, som kan dække hele Uummannaqs fjordsystem.

Tabel 1: Opskylshøjder for "worst case" skredscenarier ved maksimalt højvande på 1,3 m over middelvandstand.

	Tid til ankomst af første bølge fra Kigarsima	Opskylshøjde Kigarsima (30 x 10 ⁶ m ³)	Tid til ankomst af første bølge fra Karrat	Opskylshøjde Karrat 1 (13 x 10 ⁶ m ³)	Opskylshøjde Karrat 2 (11 x 10 ⁶ m ³)	Opskylshøjde Karrat 3 (524 x 10 ⁶ m ³)
Nuugaatsiaq	-	-	7 min	3–6 m	3–6 m	36–73 m
Illorsuit	14 min	3–4 m	13 min	3 m	3 m	19–42 m
Qaarsut	13 min	5–10 m	26 min	-	-	10–23 m
Niaqornat	15 min	3–5 m	23 min	-	-	10–16 m
Uummannaq	15 min	2–5 m	30 min	-	-	5–13 m
Saattut	14 min	2–5 m	35 min	-	-	4–10 m
Ukkusissat	5 min	4–7 m	26 min	-	-	5–7 m
Ikerasak	22 min	<2 m	38 min	-	-	4–10 m

Moderat risiko

Af de tre fjeldpartier som vurderes at have moderat risiko, ligger de to, Paatuut Øst og Illorsuaasaq, i Vaigat (Figur 4), mens et, Qaarusuup Qaqqaa, ligger på Bjørneøen i Godthåbsfjorden (Figur 5).

Ved Paatuut Øst er der et stort volumen løse sedimenter af talus og colluvium, som er i hurtig bevægelse. Det ustabile område ligner geologisk og strukturelt de skråninger, hvorfra der er sket fjeldskred i Vaigat gennem de seneste 100 år. Vurderingen er, at sedimentpakken vil kunne kollapse i et fjeldskred, men at et potentielt fjeldskred fra Paatuut Øst sandsynligvis ikke vil generere en større tsunami end den fra Paatuut i 2000.

De to andre fjeldpartier med moderat risiko, Illorsuaasaq i Vaigat og Qaarusuup Qaqqaa i Godthåbsfjorden, er karakteriseret ved, at der er meget veludviklede strukturer, men ingen tegn på nylige bevægelser. Begge fjeldpartier ligger nær beboede områder, så risikoen vil øges, hvis de skulle begynde at bevæge sig.

For de tre fjeldpartier med moderat risiko anbefaler GEUS, at der udføres periodisk monitoring vha. satellitdata (InSAR og optiske).

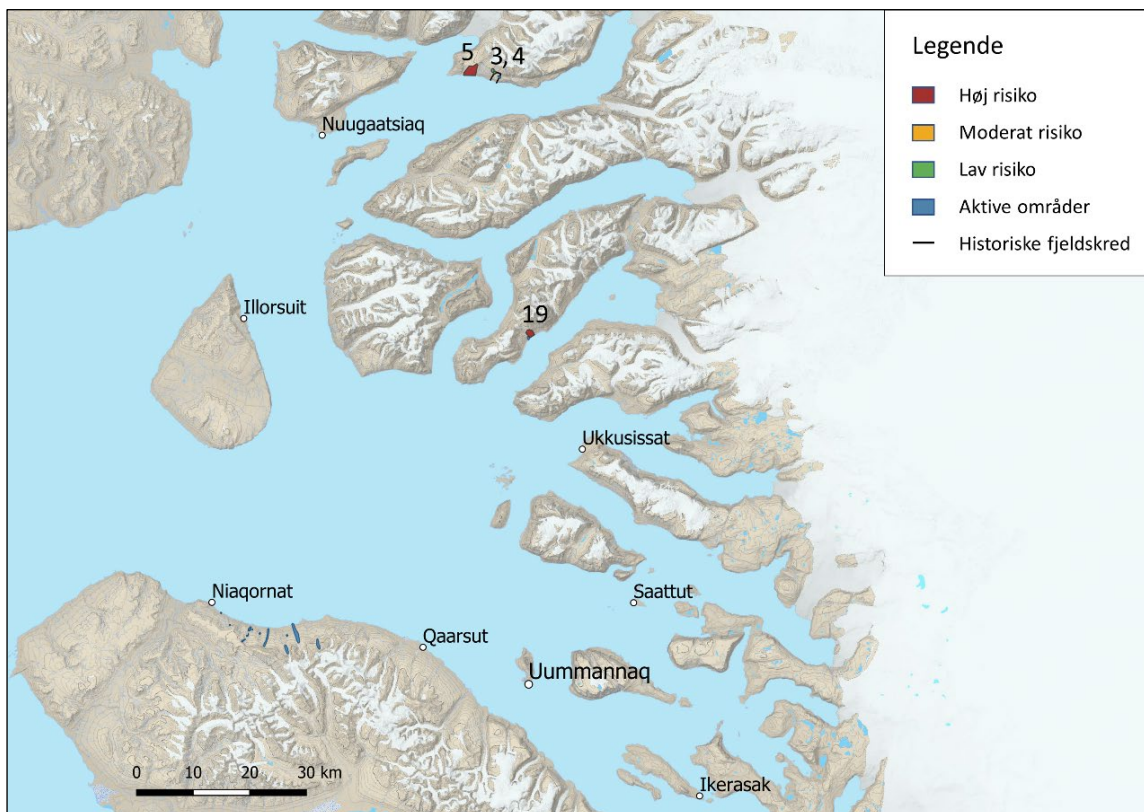
Lav risiko og øvrige lokaliteter

De to fjeldpartier Karrat 1 og Karrat 2 vurderes at have høj sandsynlighed for fjeldskred, men tsunamimodelleringen viser, at potentielle fjeldskred fra Karrat 1 og 2 kun udgør en fare for Nuugaatsiaq og Illorsuit. Så længe Illorsuit og Nuugaatsiaq er ubeboede, udgør de to fjeldpartier derfor ikke nogen risiko for beboede områder.

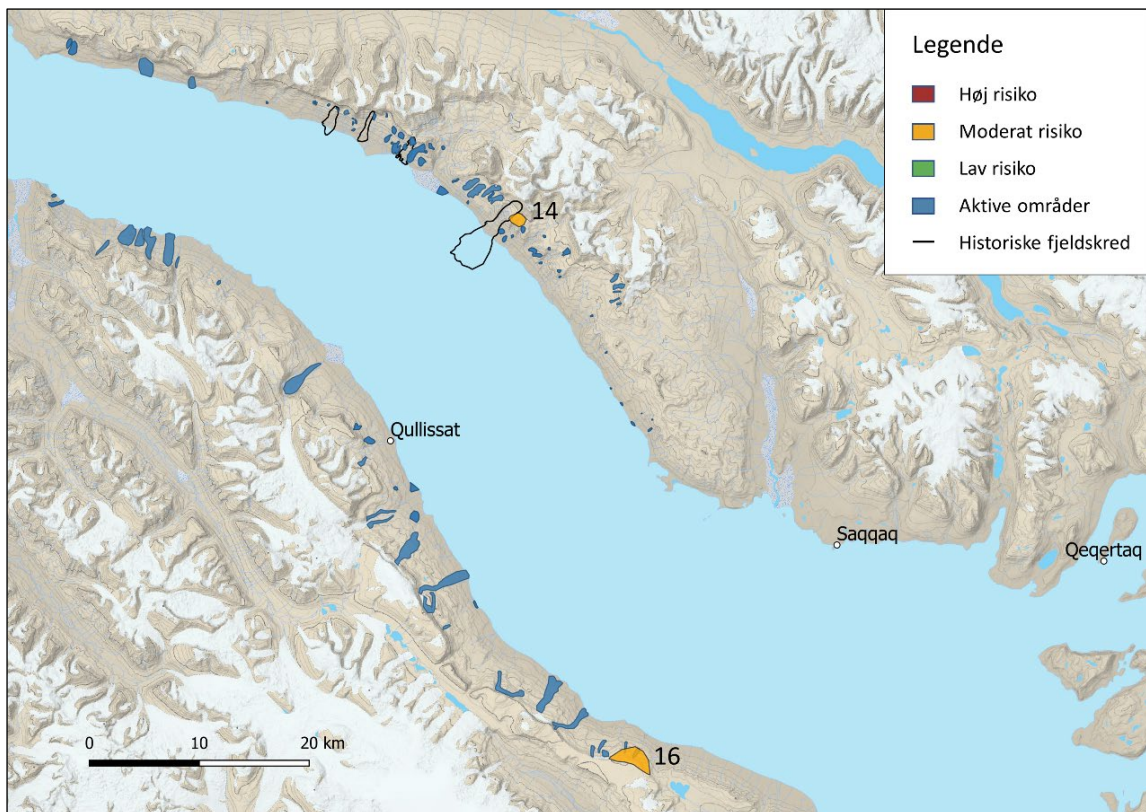
For Karrat 1 og Karrat 2 samt de 12 lokaliteter, hvor der ikke er ustabile fjeldpartier, anbefales ingen yderligere opfølgning.

Uummannaqs fjordsystem og Vaigat

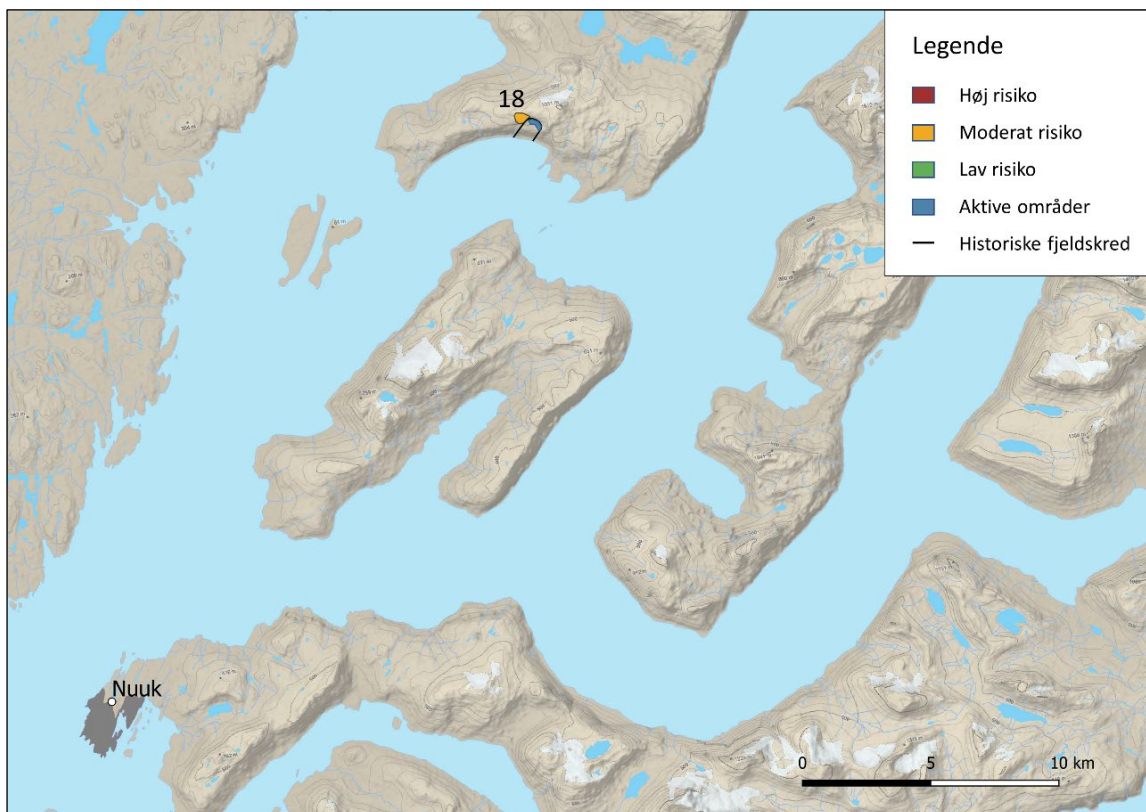
Udviklingen af historiske og nuværende ustabile områder i Uummannaqs fjordsystem og Vaigat har vist, at dette er områder, hvor ustabile områder kan udvikle sig i løbet af få år, og hvor der højst sandsynligt også i fremtiden vil ske fjeldskred. På den baggrund anbefaler GEUS, at der for alle kystskråninger i Uummannaqs fjordsystem og Vaigat udføres periodisk screening hvert 1–2 år vha. satellitdata (InSAR og optiske), for at vurdere om der er nye ustabile fjeldpartier under udvikling, og for at monitorere udviklingen af allerede kendte ustabile områder.



Figur 3: Detailkort af den nordlige del af Uummannaqs fjordsystem med markering af ustabile fjeldpartier og aktive områder med bevægelse i InSAR. De markerede fjeldpartier er Karrat 1 (nr. 3), Karrat 2 (nr. 4), Karrat 3 (nr. 5) og Kigarsima (nr. 19).



Figur 4: Detailkort af Vaigat strædet med markering af ustabile fjeldpartier og aktive områder med bevægelse i InSAR. De markerede fjeldpartier er Paatuut Øst (nr. 14) og Illorsuaasaq (nr. 16).



Figur 5: Detailkort af den sydlige del af Godthåbsfjorden med markering af ustabile fjeldpartier og aktive områder med bevægelse i InSAR. Det markerede fjeldparti er Qaarusuup Qaqqaa (nr. 18).

Leverancer

Fjeldskredsprojektets endelige afrapportering består udover nærværende sammenfattende rapport af:

- Opsummering af Fjeldskredsprojektet til Naalakkersuisut og Regeringen
- Faktablade med vurderinger af hver af de 19 undersøgte lokaliteter
- Faktablade for hver af de ni bygder eller byer som kan være udsatte for tsunamier
- GIS-projekt med de data (eller metadata for data), som er indsamlet i projektet

samt tekniske rapporter om tsunamimodellering fra Norges Geotekniske Institut:

- NGI Report 20210737-02-R: Tsunami hazard analysis in Greenland. Tsunami simulations in the Vaigat Sound, 2. september 2022.
- NGI Report no 20210737-01-R: Tsunami hazard analysis in Greenland. Runup modelling of potential tsunamis from Kigarsima, 13. juni 2022.
- NGI Report no 20200823-01-R: Tsunami hazard screening for Uummannaq fjord system – Greenland. Hazard scenario simulations and 2017 event hindcast, 26. marts 2021.

og GEUS Notater:

- GEUS Notat om risikoklassificering af ustabile fjeldpartier i Karrat og Kigarsima, Uummannaqs fjordsystem, 4. oktober 2022a.
- GEUS Notat om risiko for fjeldskred og tsunamibølger i Vaigat, 4. oktober 2022b.
- GEUS Notat om analyse af GNSS-data i Karrat 3 2021–2022, 4. oktober 2022c.
- GEUS Notat om analyse af seismologiske data i det centrale Vestgrønland 2017–2022, 4. oktober 2022d.
- GEUS Report on climate and bedrock permafrost degradation modelling, 4. oktober 2022e.
- GEUS Notat om risiko ved en tsunami udløst af et fjeldskred fra Karrat fjorden i Uummannaqs fjordsystem – opdaterede opskylskurver per august 2022, 4. august 2022.
- GEUS Notat om risiko for beboede områder ved en tsunami udløst af et fjeldskred fra lokaliteten Kigarsima i Uummannaqs fjordsystem, 14. juni 2022.
- GEUS Notat om risiko for et alvorligt fjeldskred fra lokaliteten Kigarsima i Uummannaqs fjordsystem, 8. april 2022.
- GEUS Notat om vurdering og anbefaling af muligheder for monitoring og varsling af tsunami og fjeldskred ved Karrat 3, 2. juli 2022.
- GEUS Notat om mulighederne for varsling af tsunami eller fjeldskred i Grønland, 28. juni 2021.
- GEUS Notat om risiko for fjeldskred og tsunamibølger i Uummannaqs fjordsystem – status for faglig viden marts 2021, 29. marts 2021.
- GEUS Notat om risiko for fjeldskred og tsunamibølger i Karrat Fjorden – status for faglig viden oktober 2020, 9. oktober 2020.

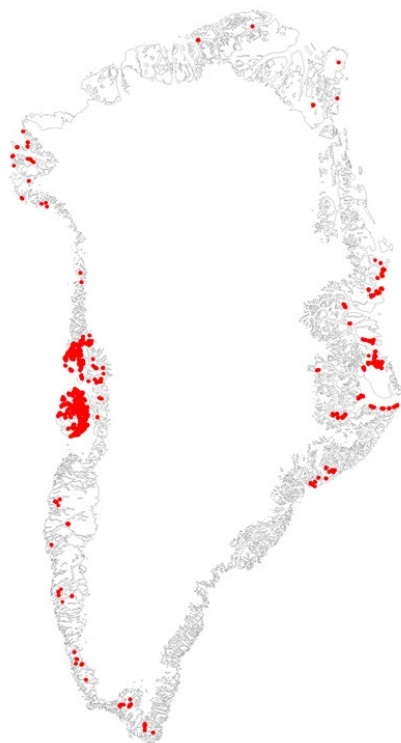
Baggrund

Screeningsundersøgelsen

Screeningsundersøgelsen (2017–2018) blev gennemført som et skrivebordsstudie og baserede sig på de tilgængelige eksisterende data, samt den viden der ellers var tilgængelig om emnet. Undersøgelsen identificerede 18 potentielt kritiske lokaliteter på den grønlandske vestkyst (som efterfølgende blev udvidet med en lokalitet, Kigarsima, i Fjeldskredsprojektet). En hoved anbefaling fra Screeningsundersøgelsen var, at de identificerede lokaliteter blev undersøgt med feltarbejde, yderligere fjernanalyse og evt. tsunamimodelleringer med henblik på at vurdere risikoen forbundet med potentielle tsunamier genereret fra lokaliteterne.

Fjeldskred i Grønland

Som en del af Screeningsundersøgelsen blev hele Grønland screenet for fjeldskred, som er sket efter sidste istid. Det resulterede i kortlægning af mere end 500 skredar eller skredaflejringer (Figur 6) (Svennevig, 2019). De tidligere fjeldskred er sket i stort set alle dele af det isfrie Grønland, men der er en udtalt koncentration af fjeldskred i det centrale Vestgrønland, hvor hele 67% af de kortlagte fjeldskred findes. Dette bekræftede en tidligere vurdering af, at det centrale Vestgrønland udgjorde et "hotspot" for fjeldskred (Pedersen et al., 2002, Dahl-Jensen et al., 2004). Inden for de sidste 100 år er der sikre efterretninger om fire store kystnære fjeldskred der har genereret tsunamier. De tre skete i Vaigat strædet i 1952, 1996 og 2000, og det fjerde er fjeldskreddet i Karrat fjorden 17. juni 2017.



Figur 6: Fjeldskred som er sket efter sidste istid i Grønland. De røde prikker repræsenterer fjeldskredsafløjninger eller ar efter fjeldskred. Figur fra Svennevig (2019).

Metoder og data

Fjeldskredsprojektet er gennemført som et multidisciplinært studie med en række forskellige data og metoder:

Kortmateriale

Der er benyttet topografiske og geologiske kort for at vurdere terrænets højde og hældning samt lagdelte bjergarters eventuelle hældning mod kysten. Derudover er der benyttet detailkort af byer og bygder leveret af Asiaq til vurdering af konsekvensen af modellerede tsunamiopskyl.

Terrænmodeller

ArcticDEM - en frit tilgængelig 2 m digital terrænmodel for det arktiske område (Porter et al., 2018) - er benyttet til at undersøge terrænet og udviklingen af ustabile områder. Dertil har GEUS produceret egne terrænmodeller for udvalgte områder baseret på skråfotos, f.eks. en terrænmodel for den sydvendte kystskråning i Karrat fjorden efter fjeldskredet 17. juni 2017.

Optiske satellitdata og flyfotos

Udviklingen af ustabile områder er analyseret vha. optiske data fra satellitterne Sentinel-2 (siden 2015) og Landsat (siden 1972), diverse højopløselige satellitdata tilgængelige via Google Earth, samt nadir luftfotos og skråfotos (optaget med års mellemrum siden 1949) og flyfoto fra Arktisk Kommando (siden 2021).

Marine data

Der er gennemført to marine togter i Vaigat og Uummannaqs fjordsystem primært med henblik på at indsamle batymetriske data. Derudover har Asiaq indsamlet detaljerede dybde data ud for Saqqaq og Qeqertaq. De indsamlede data er benyttet til at producere forbedrede batymetriske kort til brug for tsunamimodelleringen.

Feltarbejde

GEUS' geologer har indsamlet feltobservationer af skredrelaterede strukturer og geologi i perioden 2019–2022. Alle de 19 lokaliteter er undersøgt mindst en gang i perioden. Som en del af feltarbejdet er der indsamlet mere end 10 000 skråfotos af kystskråninger.

InSAR-analyser

Bevægelser i terrænet er kortlagt vha. analyser af syntetisk aperture radar (SAR) data fra Sentinel-1 satellitterne i perioden 2015–2022, som stilles frit til rådighed af EU's Copernicus jordobservationsprogram. Data er processeret enten som differential interferogrammer (DInSAR) eller tidsserieanalyse (PSI) med softwaren SARPROZ i samarbejde med forskere ved DTU.

Seismologiske data

Seismologiske data indsamlet kontinuerligt fra det centrale Vestgrønland er analyseret for at detektere og tidsfæste skredhændelser. I forbindelse med Fjeldskredsprojektet blev der installeret fire nye seismiske målestationer i det centrale Vestgrønland i 2019, og driften af de tre af dem videreføres af de grønlandske myndigheder. Sideløbende med Fjeldskredsprojektet er der arbejdet med at udvikle en metode til at skelne mellem jordskælv og andre typer seismiske hændelser.

GNSS-data

Der blev indsamlet bevægelsesdata vha. seks GNSS-stationer i Karrat 3 i et år 2021–2022.

Geofoner

I forbindelse med et sideløbende forskningsprojekt blev der i 2021–2022 installeret tre geofoner i Karrat 3. Geofonerne måler små rystelser, som kan bruges til at give en bedre forståelse af, hvor og hvornår bevægelserne sker i det ustabile fjeldparti. Data blev hentet hjem i august 2022 og vil blive processeret i det sideløbende forskningsprojekt. Data vil være til rådighed for de danske og grønlandske myndigheder til f.eks. opfølgende seismologiske studier i Karrat 3.

Klimamodellering

Degraderingen af permafrost kan ændre stabiliteten af de stejle skråninger langs Grønlands fjorde. Der er derfor benyttet klimamodellering til at lave den første vurdering af permafrost i stejle skråninger i det vestlige Grønland. Der er siden 2019 blevet indsamlet klimadata fra tre klimastationer og 20 temperaturloggere i stejle skråninger langs Vaigat for at kunne kalibrere modellen med in situ-temperaturmålinger.

Tsunamimodellering

Tsunamimodellering er udført af Norges Geotekniske Institut vha. numerisk modellering i fire trin: 1) fjeldskreddets udløb, 2) tsunamienes dannelse, 3) tsunamienes udbredelse og 4) tsunamienes opskyl i nærliggende byer og bygder. GEUS har bidraget med datagrundlaget for modelleringerne og de modellerede skredscenarier. Der er modelleret detaljerede tsunamier og resulterende opskyl i beboede områder fra potentielle fjeldskred fra Karrat 1, 2 og 3 samt Kigarsima i Uummannaqs fjordsystem. Der er ligeledes foretaget tsunamimodellering af historiske tsunamier og et potentielt fjeldskred i Vaigat.

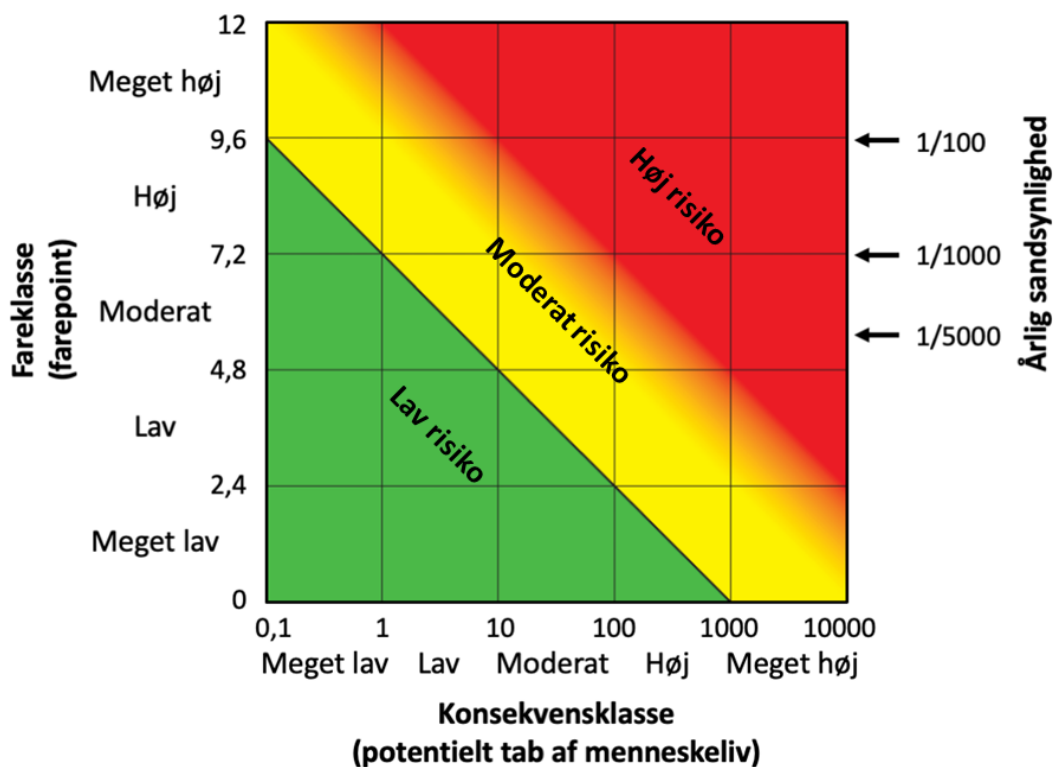
Risikoklassificering

En del af de ustabile fjeldpartier er klassificeret ved hjælp af et tilpasset norsk system til risikoklassificering, som er beskrevet i GEUS Notat af 4. oktober 2022a. Risikoen forbundet med et ustabil fjeldparti er lig sandsynligheden for, at der sker et fjeldskred, og den potentielle konsekvens af fjeldskredet. (Figur 7). I den norske risikoklassificering betegnes risikoen, som enten lav (grøn), moderat (gul) eller høj (rød).

Systemet er baseret på systematisk klassifikation af fare (lig sandsynlighed) og konsekvens. Fareklassen defineres ud fra en vurdering af det ustabile fjeldparti på baggrund af ni forskellige kriterier, som afspejler strukturgeologiske forhold, nuværende deformation i det ustabile fjeldparti samt tidligere fjeldskredshændelser (Hermanns et al., 2012). Konsekvensen af et fjeldskred defineres som det potentielle tab af menneskeliv. Dette beregnes på baggrund af antal personer, som forventes at opholde sig i tsunamienes opskylszone.

GEUS har sammen med fjeldskredseksperter fra Norge vurderet, at den tilpassede norske system til risikoklassificering kan benyttes til at fareklassificere de grønlandske ustabile fjeldpartier som sker i fast klippe, som f.eks. Kigarsima og de tre fjeldpartier i Karrat fjorden. Det er endnu usikkert, om fareklassificeringen kan benyttes til fjeldskred som sker i blødere materiale, som f.eks. i Vaigat. Fareklassificeringen er tilpasset de geologiske forhold i Grønland for at tage højde for, at ustabile fjeldpartier i Grønland generelt bevæger sig betydeligt hurtigere end ustabile fjeldpartier i Norge.

I Norge er der etableret en sammenhæng mellem fareklasse og årlig sandsynlighed baseret på mange års kortlægning, detaljerede undersøgelser og dateringer af et stort antal tidligere fjeldskred. Et sådant arbejde er endnu ikke udført i Grønland, hvorfor det ikke vides, hvordan den årlige sandsynlighed fra den norske risikoklassificering kan overføres til ustabile fjeldpartier i Grønland.



Figur 7. Den norske risikomatrix, hvori risiko defineres som produktet af fare og konsekvens. Grøn svarer til "lav risiko", gul svarer til "moderat risiko", og rød svarer til "høj risiko". Grænsen mellem moderat og høj risiko er gradvis for at afspejle, at der i denne del af risikomatricen er behov for ekspertvurdering af specifikke forhold for det enkelte ustabile fjeldparti for at kunne klassificere dets risiko. Den årlige sandsynlighed, som den er beregnet for Norge, er angivet i matrixens højre side.

Inddragelse af international ekspertise

Der er løbende blevet inddraget international ekspertise i forskellige dele af arbejdet. Det er primært fra Norges Geologiske Undersøgelse (NGU), Norges Vassdrags- og Energidirektorat (NVE) og den Schweiziske Seismologiske Tjeneste (SED) ved ETH Zürich, men også andre institutioner har været involveret. En vigtig kvalitetssikring af arbejdet i Fjeldskredsprojektet er etableret ved løbende drøftelser samt deltagelse i feltarbejdet i 2021 af den internationalt anerkendte fjeldskredsekspert Reginald Hermanns fra NGU.

Fjeldpartier med høj risiko

Fjeldpartierne Karrat 3 og Kigarsima (nr. 5 og 19 på Figur 3), som begge ligger i Uummannaqs fjordsystem, er klassificeret med høj risiko. Konsekvensen af potentielle fjeldskred fra de to er estimeret vha. detaljerede tsunamimodelleringer og befolkningstal fra Grønland. For begge fjeldpartier anbefaler GEUS, at fjeldpartierne monitoreres og undersøges yderligere af skredeksperter i felten med henblik på at udvikle forståelsen af mulige scenarier og deres sandsynlighed til understøttelse af de løbende beslutninger i beredskabet. Det anbefales ligeledes, at der iværksættes udvikling af et tsunamivarslingssystem, som kan dække hele Uummannaqs fjordsystem.

Karrat 3

Karrat 3 (lokalitet nr. 5) er et stort ustabil fjeldparti i Karrat fjorden i den nordlige del af Uummannaqs fjordsystem. Karrat 3 ligger på den kystskrånning, hvor fjeldskredet skete den 17. juni 2017, ca. 4 km længere mod vest. Fjeldpartiet er meget stort, ca. 2000 x 1600 meter med en ukendt fortsættelse under havniveau, og det har en veludviklet bagvæg på 120 meters højde og frigørelsesflader til begge sider (Figur 8). Det samlede volumen er ca. 524 millioner m³.



Figur 8: Det ustabile fjeldparti Karrat 3. Den sorte stiplede linje viser omridset af fjeldpartiet, som er i bevægelse. Bagvæggen af fjeldpartiet er 120 m høj og ses tydeligt i billedet.

Bevægelsen i Karrat 3 er heterogen. Bevægelsesmålinger med GNSS og InSAR viser, at den øvre del bevæger sig med ca. 5–10 cm/år, mens den nedre del bevæger sig med 20 cm/år eller mere. Nederst i fjeldpartiet er der to store områder, hvor der måles bevægelse på

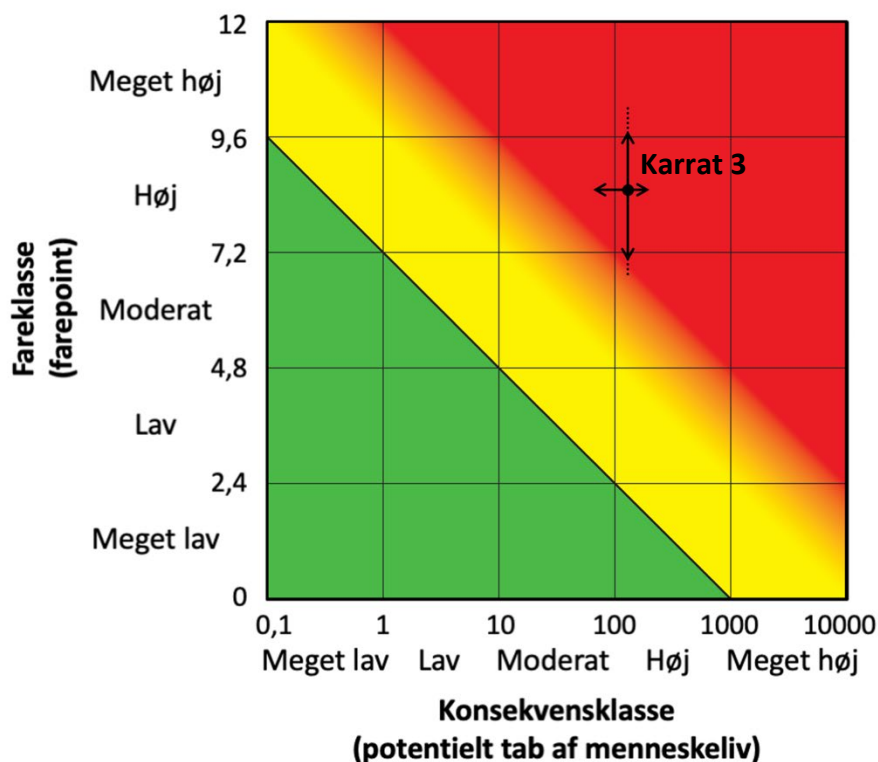
mere end 1 m/år (GEUS Notat af 4. oktober 2022c). Karrat 3 ustabiliteten ses tydeligt i flyfoto fra 1953, hvilket viser, at området har været aktivt i meget lang tid, muligvis hundreder eller tusinder af år.

De metamorfoserede sedimenter, som fjeldsiden består af, hælder 20°–30° mod fjorden og udgør formentlig glideplan for Karrat 3 (Figur 9). På samme kystskråning er der udover fjeldskredet 17. juni 2017 også sket fjeldskred i 2009 og 2016 samt sandsynligvis i forhistorisk tid. To andre ustabile områder, Karrat 1 og Karrat 2, findes mellem Karrat 3 og skredarret fra 17. juni 2017 fjeldskredet.



Figur 9: Feltfoto fra skredkysten ved Karrat. De geologiske lag, som den sydvendte fjeldside i Karrat fjorden består af, hælder 20°–30° mod fjorden (dip-slope) og har mange kystparallelle sprækker, hvilket øger sandsynligheden for skred.

GEUS vurderer på baggrund af den tilpassede norske fareklassificering, at Karrat 3 har høj fareklasse (GEUS Notat af 4. oktober 2022a). Tsunamimodelleringen fra Norsk Geoteknisk Institut viser, at et fjeldskred fra Karrat 3 vil medføre meget store opskylnshøjder i Uummannaqs fjordsystem, med et potentielt tab af menneskeliv i moderat-høj konsekvensklasse (GEUS Notat af 4. august 2022). Med udgangspunkt i estimerterne af fare- og konsekvensklasse klassificeres Karrat 3 derfor med høj risiko (Figur 10).



Figur 10: Risikomatrix for Karrat 3. Usikkerheden i fareklassen afspejler, at der er begrænset datagrundlag i nogle af farekriterierne, som afspejler fjeldpartiets strukturgeologiske forhold, nuværende aktivitet og tidligere fjeldskredshændelser i området. Usikkerheden i konsekvensklassen afspejler spændet af realistiske skredscenarier og det, at fjeldskredet kan ske både ved lavvande og højvande. Fra GEUS Notat af 4. oktober 2022a.

Karrat 3 og konsekvenserne af en tsunami genereret af et potentielt fjeldskred fra fjeldpartiet er beskrevet nærmere i Faktablad nr. 5, NGI Report af 26. marts 2021, GEUS Notat af 29. marts 2021 og 4. august 2022, faktablade for Uummannaq og bygderne i Uummannaqs fjordsystem, samt en videnskabelige publikation af Svennevig et al. (2020). Risikovurderingen er beskrevet i GEUS Notat af 4. oktober 2022a. Mulighederne for monitorering og varsling af tsunami fra Karrat 3 er beskrevet i GEUS Notat af 2. juli 2021.

Kigarsima

Det ustabile fjeldparti Kigarsima (lokalitet nr. 19) ligger yderst i Kangerluarsuk fjorden, 45 km syd for Karrat fjorden, og geologien i de to områder er den samme. De geologiske lag i området hælder 20–23° mod fjorden.

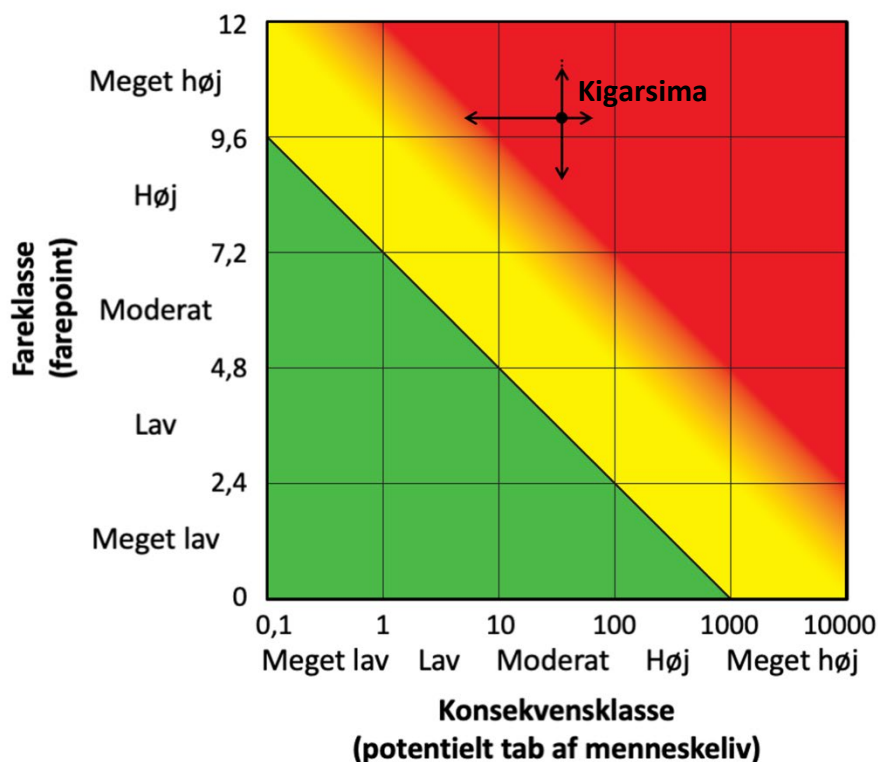
Det ustabile område i bevægelse er 1250 m langt og 750 m bredt (Figur 11). Det er afgrænset opadtil af en 10–20 m høj bagvæg i 650 m højde. Det ustabile fjeldparti har haft en meget hurtig og accelererende udvikling igennem de seneste ca. 10 år. Strukturelle analyser viser, at det ustabile område ikke er selvstabiliserende, og det må antages, at bevægelsen vil fortsætte og eventuelt accelerere yderligere. Volumenet af det ustabile område er beregnet til ca. 28 millioner m³.



Figur 11: Det ustabile fjeldparti Kigarsima. Den sorte stiplede linje viser omfanget af det ustabile område kortlagt ud fra InSAR. Bagvæggen, dvs. den øvre afgrænsning, af Kigarsima ligger i 650 m højde. Bemærk at der også neden for det store ustabile område og på den modsatte side af kløften er to mindre områder i bevægelse (markeret med grå stiplede omrids), som dog vurderes at have volumener, der er for små til at kunne forårsage en markant tsunami.

GEUS vurderer på baggrund af den tilpassede norske fareklassificering, at Kigarsima har meget høj fareklasse (GEUS Notat af 4. oktober 2022a). Tsunamimodelleringen fra Norsk Geoteknisk Institut viser, at et fjeldskred fra Kigarsima vil give høje opskyl i Qaarsut, Niaqornat og Ukkusissat, med et potentielt tab af menneskeliv i moderat konsekvensklasse (GEUS Notat af 4. august 2022). Med udgangspunkt i estimerne af fare- og konsekvensklasse klassificeres Kigarsima derfor med høj risiko (Figur 12).

Fjeldpartiet Kigarsima og konsekvenserne af en tsunami genereret af et potentielt fjeldskred fra Kigarsima er beskrevet nærmere i Faktablade nr. 19, GEUS Notat af 8. april 2022 og 14. juni 2022, NGI Report af 13. juni 2022, samt faktablade for Uummannaq og bygderne i Uummannaqs fjordsystem.



Figur 12: Risikomatrix for Kigarsima. Usikkerheden i fareklassen afspejler, at der er begrænset datagrundlag i nogle af farekriterierne, som afspejler fjeldpartiets strukturgeologiske forhold, nuværende aktivitet og tidligere fjeldskredshændelser i området. Usikkerheden i konsekvensklassen afspejler spændet af realistiske skredscenarier og det, at fjeldskredet kan ske både ved lavvande og højvande. Fra GEUS Notat af 4. oktober 2022a.

Anbefaling

Det anbefales, at der udføres monitoring og feltundersøgelser af de to fjeldpartier Karrat 3 og Kigarsima, der er klassificeret med høj risiko. Det anbefales ligeledes, at der iværksættes udvikling af et tsunamivarslingssystem baseret på seismisk detektion af tsunamibølgen.

Undersøgelserne har vist, at fjeldskred fra Karrat 3 og fra Kigarsima med efterfølgende tsunami udgør en høj risiko for de beboede områder i Uummannaqs fjordsystem. GEUS anbefaler, at begge fjeldpartier monitoreres og undersøges yderligere af skred eksperter i feltet med henblik på at udvikle forståelsen af mulige scenarier og deres sandsynlighed til understøttelse af de løbende beslutninger i beredskabet. Monitoring af de to fjeldpartier anbefales som minimum at omfatte indsamling og analyse af GNSS- og InSAR-data samt klimatiske data fra en vejstation. Der kan med fordel installeres hjørnereflektorer i de ustabile fjeldpartier for at få InSAR-data hele året.

GEUS vurderer, at der sandsynligvis vil kunne udvikles en metode til seismisk detektion af et tsunamisignal, idet signalet afviger betydeligt fra andre seismiske signaler. Det er dog en udfordring, at der vil gå kort tid fra et fjeldskred sker til tsunamien rammer berørte bygder, hvorfor der ikke vil være tid til ekspertvurdering af de detekterede signaler. Udover installation af seismiske instrumenter vil metoden således kræve udvikling af software som

automatisk kan skelne mellem signal fra tsunami og andre seismiske signaler. Det vil tage mindst 2–3 år, før der vil kunne være et egentligt varslingsystem, og der er ikke nogen garanti for, at det kommer til at virke, bl.a. fordi der kun er én tidligere hændelse på én station (2017 fjeldskredet på den seismiske station i Nuugaatsiaq) at træne systemet med.

Fjeldpartier med moderat risiko

Tre stabile fjeldpartier vurderes at have moderat risiko. For disse anbefaler GEUS, at der udføres periodisk monitoring vha. satellitdata (InSAR og optiske).

Paatuut Øst

Paatuut Øst ligger på sydkysten af Nuussuaq (nr. 14 på Figur 4) umiddelbart øst for Paatuut, hvor der er sket store fjeldskred i 1996 og 2000. I den øvre del af skråningen, i 700–900 m højde, er der et stort volumen på ca. 55 millioner m³ af løse sedimenter af talus og colluvium, som har været i bevægelse siden midten af 1970'erne (Figur 13). Bevægelsen i dag er hurtig, sandsynligvis flere m per år. Sedimentpakken er kendetegnet ved en kaotisk og opbrudt overflade, hvorfra der sker hyppige småskred.



Figur 13: Skråfoto fra helikopter af Paatuut Øst. Det store volumen af løse sedimenter (markeret med hvidt stiplet omrids) ligger i 700–900 m højde umiddelbart øst for kildeområdet for Paatuut 2000 fjeldskredet (blåt stiplet omrids).

Paatuut Øst er ikke fareklassificeret, fordi det endnu er usikkert, hvor retvisende den tilpassede norske fareklassificering er i denne type geologi, hvor det er vanskeligt at definere de strukturelle kriterier for bagvæg, frigørelsesflader og brudflade, som indgår i

definitionen af fareklassen. Det ustabile område ligner geologisk og strukturelt set de fjeldskred som er sket i Vaigat inden for de seneste 100 år (Svennevig et al., 2022; in prep., 2022b), og det vurderes, at sedimentpakken vil kunne kollapse i et fjeldskred. Baseret på beliggenheden af sedimentpakken og dets estimerede volumen vurderes det, at et potentielt fjeldskred fra Paatuut Øst sandsynligvis ikke vil generere en større tsunami end den fra Paatuut i 2000. Idet tsunamien i 2000 ikke medførte skader på land i Saqqaq, er der derfor ikke foretaget en detaljeret tsunamimodellering for Paatuut Øst. Risikoen forbundet med et potentielt fjeldskred og tsunami fra Paatuut Øst vurderes at være moderat.

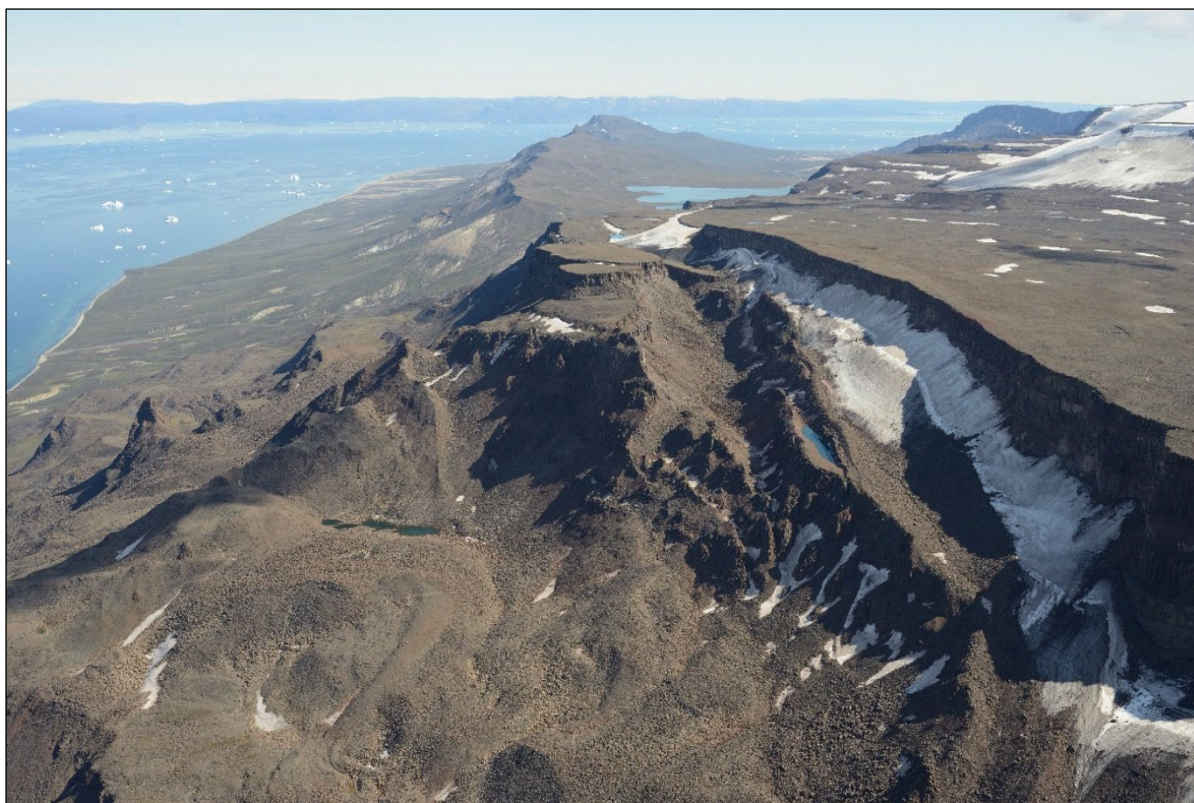
Paatuut Øst er beskrevet nærmere i Faktablad nr. 14.

Illorsuaasaq

Det ustabile fjeldparti Illorsuaasaq ligger ved den nordøstlige kant af basaltplateauet på Diskos nordkyst (nr. 16 på Figur 4). Her er der i 950 m højde en stor basaltblok på ca. 3500 x 350 m, som er nedforkastet med ca. 15 m og helt adskilt fra plateauet af brede sprækker fyldt med is (Figur 14). På skråningen nedenfor ses flere basaltblokke, som har bevæget sig længere ned ad skråningen. Blokkene ligger i den østlige ende af et forhistorisk megaskred, der stemmer overens med en 15 km lang og 300 m tyk skredlobe på bunden af Vaigat (Svennevig et al. in prep., 2022a).

InSAR-analyse og feltobservationer viser, at der i dag ikke er bevægelse i skredblokkene. Det indikerer, at fjeldpartiet har haft en tidligere fase af aktivitet, men at det har ligget stille de seneste mange år (måske >1000 år). Bunden af skredblokkene er dækket af talusaflejringer og aktive blokglechere.

Den største blok har et areal på ca. 720 000 m² og med en tykkelse på 200 m vil det give et volumen på ca. 150 millioner m³. Det samlede volumen kan derfor potentielt være meget stort. Et muligt scenarie for det ustabile fjeldparti ved Illorsuaasaq er, at det ustabile fjeldparti reaktiveres og styrter ned i et fjeldskred. Før dette kan ske, vil man dog forvente, at blokkene vil have en fase af begyndende og accelererende bevægelse, der kan strække sig fra flere år til mange tital af år.



Figur 14: Skråfoto fra helikopter kiggende mod øst af de øverste blokke ved Illorsuaasaq. Den øverste blok i 950 m højde er nedforkastet med ca. 15 m og er helt adskilt fra plateauet af brede sprækker fyldt med is.

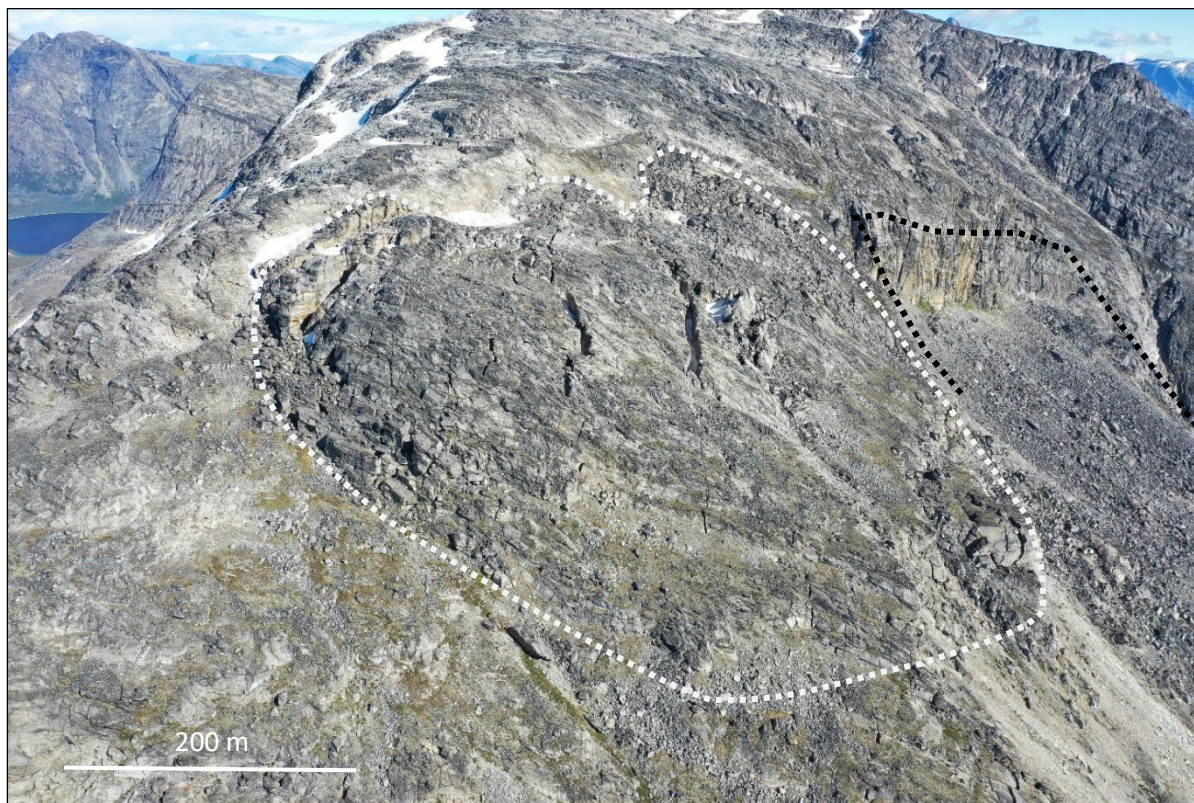
GEUS vurderer på baggrund af den tilpassede norske fareklassificering, at Illorsuaasaq har meget lav fareklasse. Der er ikke foretaget tsunamimodellering og en beregning af det potentielle tab af menneskeliv, fordi volumen af det ustabile fjeldparti er meget vanskeligt at estimere, så længe der ikke er bevægelse. Fjeldpartiet har dog potentielt et meget stort volumen og ligger nær Saqqaq og Qeqertaq, så risikoen vil øges betydeligt, hvis det skulle begynde at bevæge sig. Risikoen forbundet med et potentielt fjeldskred og tsunami fra Illorsuaasaq vurderes derfor at være moderat. Hvis fjeldpartiet begynder at bevæge sig, bør der foretages yderligere feltbesøg for at bestemme størrelsen af det ustabile fjeldparti samt mulige skredscenarier og deres risiko.

Illorsuaasaq er beskrevet nærmere i Faktablad nr. 16.

Qaarusuup Qaqqaa

Det ustabile fjeldparti Qaarusuup Qaqqaa ligger på Bjørneøen i Godthåbsfjorden 25 km nord for Nuuk (nr. 18 på Figur 5). Her er der i 700 m højde et område som er gennemskåret af sprækker, tæt ved et forhistorisk fjeldskred (Figur 15). Fjeldpartiet har meget veludviklede strukturer, men viser ingen tegn på nylige bevægelser, udover stenfaldsaktivitet fra fjeldpartiets nedre del. Der er en veludviklet op til 45 m høj bagvæg, som hælder parallelt til subparallelt med lagdelingen og kan følges langs hele fjeldpartiets afgrænsning bagtil. Hele fjeldpartiet er gennemskåret af vertikale sprækker, som stryger enten parallelt med eller vinkelret på kysten. De største sprækker er mere end 10 m brede. Volumen af fjeldpartiet

estimeres at være maksimalt 6,5 millioner m³. InSAR-analyse og feltobservationer viser, at der i dag ikke er målbar bevægelse i fjeldpartiet.



Figur 15: Dronefoto af det ustabile fjeldparti Qaarusuup Qaqqaa (markeret med hvidt stiplede omrids). I baggrunden ses skredareet fra det forhistoriske fjeldskred (sort stiplede omrids).

GEUS vurderer på baggrund af den tilpassede norske fareklassificering, at Qaarusuup Qaqqaa har moderat fareklasse. Der er ikke foretaget detaljeret tsunamimodellering og beregning af det potentielle tab af menneskeliv, fordi der ikke er bevægelse i fjeldpartiet. Ifølge den empiriske SPLASH-formel (Oppikofer et al., 2018), som beregner opskylshøjde ud fra volumen af skredmasserne, afstand ad vandvejen og afbøjning af tsunamibølgen rundt om forhindringer, kan et fjeldskred på 6,5 millioner m³ generere et opskyl på 4,5 m på nordkysten i Nuuk ved middelvandstand. Da der er tale om et translationskred, der ikke er selvstabiliserende (se f.eks. Svennevig og Keiding, 2020), vil risikoen hurtigt øges, hvis fjeldpartiet begynder at bevæge sig. Så længe der ikke er bevægelse i fjeldpartiet, vurderes risikoen forbundet med et potentielt fjeldskred og tsunami fra Qaarusuup Qaqqaa at være moderat.

Qaarusuup Qaqqaa er beskrevet nærmere i Faktablad nr. 18.

Anbefaling

Det anbefales, at der foretages periodisk monitoring af de tre ustabile fjeldpartier Paatuut Øst, Illorsuaasaq og Qaarusuup Qaqqaa vha. satellitdata (InSAR og optiske) i kombination

med den opsamlede viden om de geologiske processer og skredhistorikken i områderne. Ingen af de tre fjeldpartier vurderes at udgøre en akut risiko for beboede områder, men risikoniveauet kan ændre sig. Ved Paatuut Øst er der et stort volumen af løse sedimenter, som er i hurtig bevægelse, og GEUS vurderer, at sedimentpakken vil kunne kollapse i et fjeldskred. Periodisk monitoring vha. satellitdata (især optiske) hvert 1–2 år anbefales for at holde øje med, om der sker væsentlige ændringer. De ustabile fjeldpartier Illorsuaasaq på nordkysten af Disko og Qaarusuup Qaqqaa på Bjørneøen ved Nuuk er begge kendetegnet ved, at de har veludviklede skredstrukturer, men at der ikke måles bevægelse i dem. Illorsuaasaq ligger 20 km fra Saqqaq og har potentielt et meget stort volumen. Qaarusuup Qaqqaa ligger 25 km fra Nuuk og har et mindre volumen, men meget veludviklede strukturer. Hvis fjeldpartierne begynder at bevæge sig, vil risikoen øges. Det anbefales, at Illorsuaasaq monitoreres med nogle få års mellemrum, og at Qaarusuup Qaqqaa monitoreres mindst en gang om året vha. satellitdata (især InSAR-data), for at holde øje med, om fjeldpartierne skulle blive aktive.

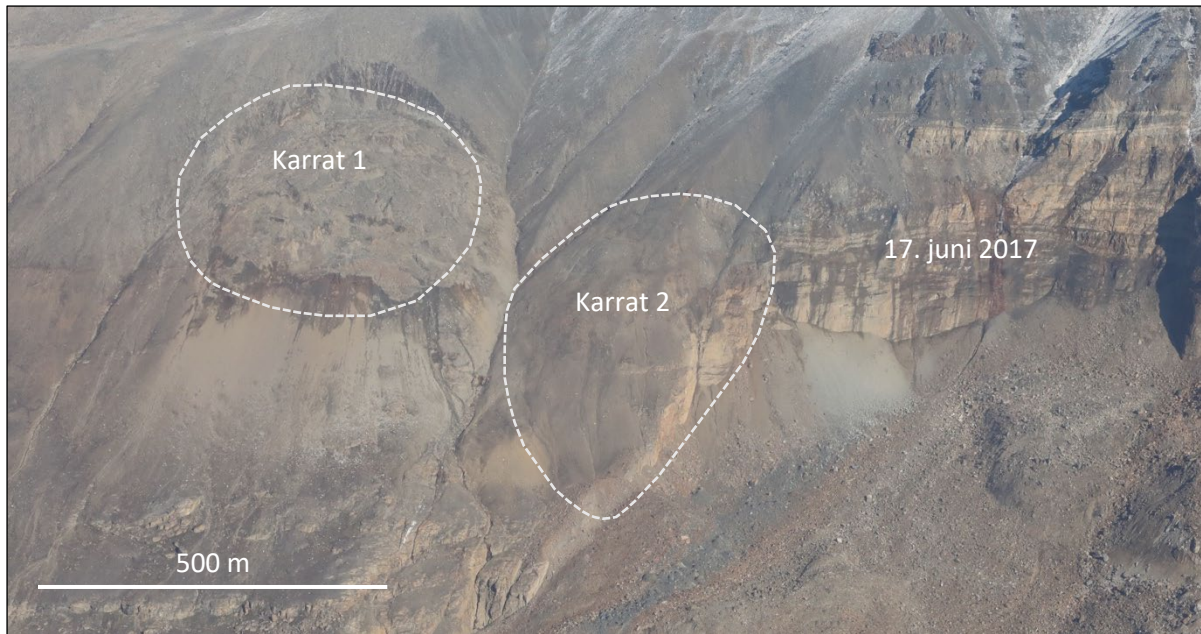
Fjeldpartier med lav risiko

De to ustabile fjeldpartier Karrat 1 og 2 i Karrat fjorden (nr. 3 og 4 på Figur 3) vurderes at have meget høj sandsynlighed for fjeldskred, men udgør ingen risiko for beboede områder, så længe Illorsuit og Nuugaatsiaq er ubeboede. Af den grund anbefales der ingen yderligere opfølgning for disse to fjeldpartier, udover en generel opmærksomhed på risikoen for fjeldskred og tsunami fra de to ustabile fjeldpartier i forbindelse med ophold og færdsel i området.

Karrat 1 og 2

Karrat 1 ligger ca. 500 m vest for 17. juni 2017 skredet i 1200 m højde (Figur 16). Fjeldpartiets overflade er stærkt opbrudt, og der er betydelig stenfaldsaktivitet fra fjeldpartiets nedre del (Svennevig et al., 2020). Bagvæggen er veludviklet i fast fjeld og op til 50 m høj. Fjeldpartiet har været i bevægelse siden maj 2015 og bevæger sig i dag sandsynligvis med flere meter om året. Aktiviteten i den nedre del af Karrat 1 har været tiltagende i det seneste år.

Karrat 2 ligger umiddelbart vest for 17. juni 2017 fjeldskredet i 600 til 900 m højde (Figur 16). Fjeldpartiet afgrænses mod nord af sprækker, der er tolket til at være den vestlige forlængelse af bagvæggen fra 17. juni 2017 fjeldskredet (Svennevig et al., 2020). Der er meget hyppig stenfaldsaktivitet fra den østlige afgrænsning af Karrat 2, ind mod skredarret fra 2017-fjeldskredet. Karrat 2 har vist tegn på bevægelse siden 2015 og har siden juni 2017 dekorreleret i Sentinel-1 interferogrammer, hvilket indikerer bevægelser på mere end 50 cm/år.



Figur 16: Skråfoto fra helikopter af Karrat 1 og 2 samt en del af skredarret fra 17. juni 2017 fjeldskredet.

Feltundersøgelserne har vist, at tidligere fjeldskred og de ustabile fjeldpartier i Karrat sandsynligvis er strukturelt betingede pga. lagdelingen som hælder 20°–30° mod fjorden (dip-slope) og tilstedeværelsen af vertikale sprækker i området.

GEUS vurderer på baggrund af den tilpassede norske fareklassificering, at både Karrat 1 og Karrat 2 har meget høj fareklasse. Tsunamimodelleringen viser, at potentielle fjeldskred fra Karrat 1 og 2 kun udgør en fare for Nuugaatsiaq og Illorsuit, hvor der i værste fald kan genereres opskyl på henholdsvis 3–6 m og 3 m. Så længe Illorsuit og Nuugaatsiaq er ubeboede, udgør de to fjeldpartier derfor ikke nogen risiko for beboede områder. Det anbefales dog, at der er en generel opmærksomhed på risikoen for fjeldskred og tsunami fra de to ustabile fjeldpartier i forbindelse med ophold og færdsel i Karrat fjorden.

Karrat 1 og 2 og konsekvenserne af tsunamier genereret af potentielle fjeldskred er beskrevet nærmere i Faktablade nr. 3 og 4, GEUS Notat af 29. marts 2021 og 4. august 2022, NGI Report af 26. marts 2021, samt faktablade for Illorsuit og Nuugaatsiaq. Risikovurderingen er beskrevet i GEUS Notat af 4. oktober 2022a.

Øvrige lokaliteter

Af de 19 inkluderede lokaliteter har undersøgelserne vist, at 12 lokaliteter ikke har ustabile fjeldpartier. De 12 lokaliteter er dels tidligere fjeldskred, hvor det vurderes, at der ikke længere er ustabilitet (nr. 2, 6, 9, 12, 13 og 17), dels lokaliteter med skredstrukturer, som ikke udgør egentlige fjeldpartier (nr. 1, 8 og 15), og dels lokaliteter med strukturer, som viste sig ikke at være skredrelaterede, men i stedet fluviale nedskæringer i terrænet eller en lokalt afvigende geologi (nr. 7, 10 og 11). Lokaliteterne, som viste sig ikke at være ustabile fjeldpartier, inkluderer lokaliteterne ved Siorapaluk, Søndre Upernavik og Sisimiut, hvor der således ikke længere anses for at være særlig risiko for fjeldskred.

Lokaliteterne er beskrevet nærmere på deres respektive faktablade.

Uummannaqs fjordsystem og Vaigat

Ud over anbefalingerne for specifikke lokaliteter, anbefaler GEUS, at det prioriteres højt, at der foretages en periodisk screening hvert 1–2 år vha. InSAR-data og optiske satellitbilleder for alle kystskråninger i Uummannaqs fjordsystem og Vaigat. Med screening forstås her monitorering af regionale områder.

Jævnlig screening i kombination med den opsamlede viden om de geologiske processer og skredhistorikken i området anbefales for at sikre, at man kan nå at opdage og vurdere eventuelle nye ustabile fjeldpartier, og for at monitorere udviklingen af allerede kendte ustabile områder. Idet screeningen i praksis er monitorering af regionale områder, kan monitoreringen af de to fjeldpartier med moderat risiko i Vaigat udføres som en del af den anbefalede screening.

Uummannaqs fjordsystem

Det tragiske fjeldskred den 17. juni 2017 skete i den nordlige del af Uummannaqs fjordsystem. Fjeldskredet genererede en tsunami med 75–100 m høje bølger neden for fjeldsiden, hvorfra tsunamien forplantede sig ud i Karrat fjorden. Tsunamien nåede Nuugaatsiaq efter 7,5 minutter med 10 m høje opskyl og Illorsuit efter 13 minutter med 3 m høje opskyl.

De to høj-risiko fjeldpartier Karrat 3 og Kigarsima ligger begge i Uummannaqs fjordsystem i den geologiske Karrat Gruppe, der består af metamorfoserede sedimente og vulkanske bjergarter, som overligger og er foldet med gnejs fra Arkæikum. De metamorfoserede sedimente har en tydelig lagdeling, som skaber en strukturel forudsætning for ustabilitet, når lagene hælder mod fjorden.

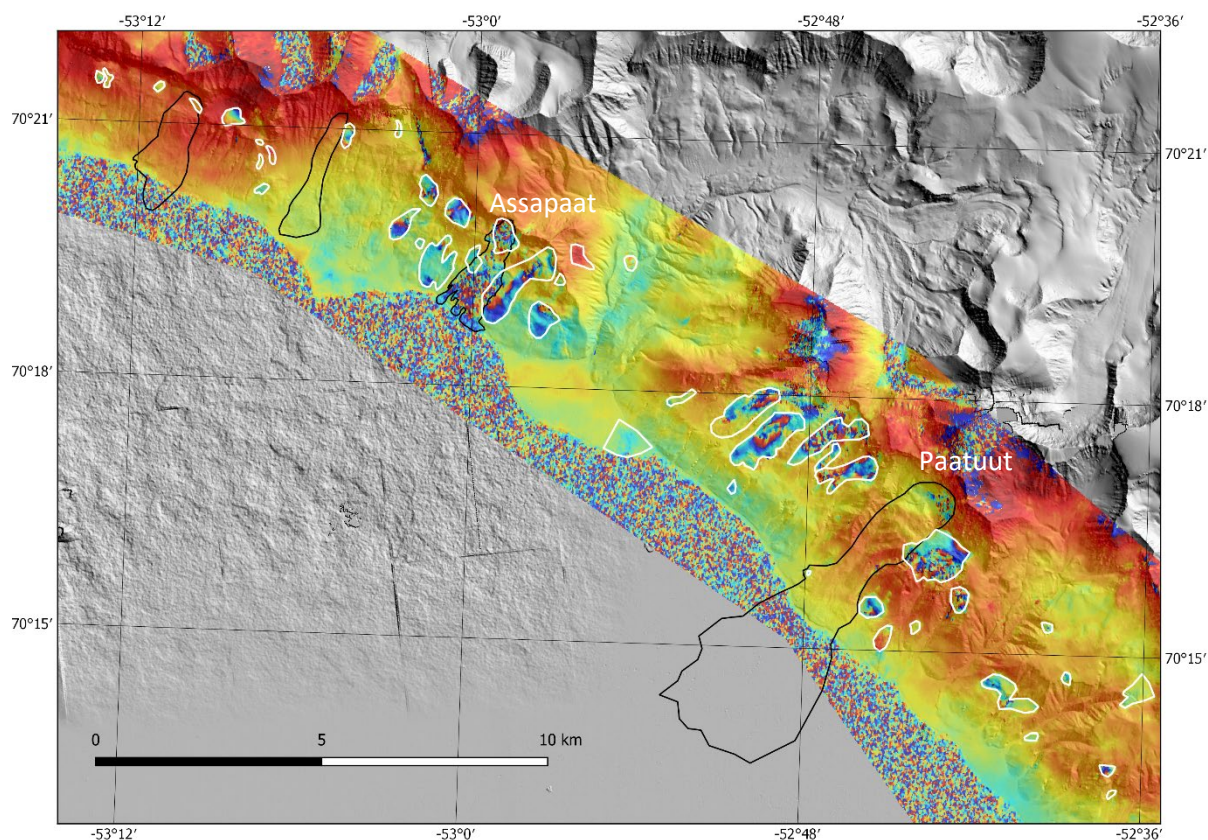
Udviklingen af historiske og nuværende ustabile områder i Uummannaqs fjordsystem har vist, at der kan gå få år fra de første tegn på, at der er et ustabil fjeldparti under udvikling, til der sker et fjeldskred. For eksempel var der ikke tydelige tegn på ustabilitet i fjeldsiden før fjeldskredet i Karrat den 17. juni 2017, og det ustabile fjeldparti nr. 19 Kigarsima har udviklet sig til et høj-risiko fjeldparti i løbet af bare ca. 10 år. Det anbefales derfor, at det prioriteres højt, at der foretages en periodisk screening hvert 1–2 år vha. InSAR-data og optiske satellitbilleder for alle kystskråninger i Uummannaqs fjordsystem for at vurdere, om der er nye ustabile fjeldpartier under udvikling. Hvis screeningen viser en øgning af faren for specifikke skråninger, anbefales det, at der følges op med feltbesøg og yderligere analyser for at bestemme mulige skredscenarier og deres risiko.

Vaigat

Kystskråningerne i Vaigat strædet i det centrale Vestgrønland er præget af betydelig fjeldskredsaktivitet. Dette gælder både i forhistorisk (tusinder af år siden) samt i historisk tid (de sidste 100 år), og der vil højst sandsynligt også i fremtiden ske fjeldskred i Vaigat.

Grønlands mest skredaktive kyststrækninger findes i dag her. Både sydkysten af Nuussuaq og nordkysten af Disko har adskillige aktive områder, herunder mange ustabile skråninger i talus og colluvium. Langs en strækning på bare 20 km af Nuussuaqs sydkyst er der inden for de seneste ca. 100 år sket ikke mindre end fem større fjeldskred, hvoraf de tre har genereret

en tsunami i Vaigat. Det er også her størstedelen af de nuværende ustabile skrånninger findes (Figur 17).



Figur 17: Den centrale del af Nuussuaqs sydkyst med et udsnit af et InSAR interferogram fra 20. – 26. juli 2021 (sydgående sport 25), plottet oven på en hillshade af ArcticDEM. Områder med bevægelse i InSAR er markeret med hvide omrids, og historiske fjeldskred er markeret med sorte omrids. To historiske fjeldskred er sket fra Paatuut i henholdsvis 1996 og 2000. Bemærk det støjfyldte InSAR-signal i udløbsområdet for fjeldskredet fra Assapaat 13. juni 2021.

Den største tsunami i Vaigat i historisk tid blev genereret af fjeldskredet ved Paatuut i november 2000, og ramte Qullissat og Saqqaq med bølger på henholdsvis 12 m og 3 m. Ingen af de ustabile talusskrånninger som er identificerede i dag, har en størrelse eller en geometri, som indikerer, at et potentielt fjeldskred vil generere en større tsunami end den i 2000, som ikke forårsagede nogen skade på land i Saqqaq.

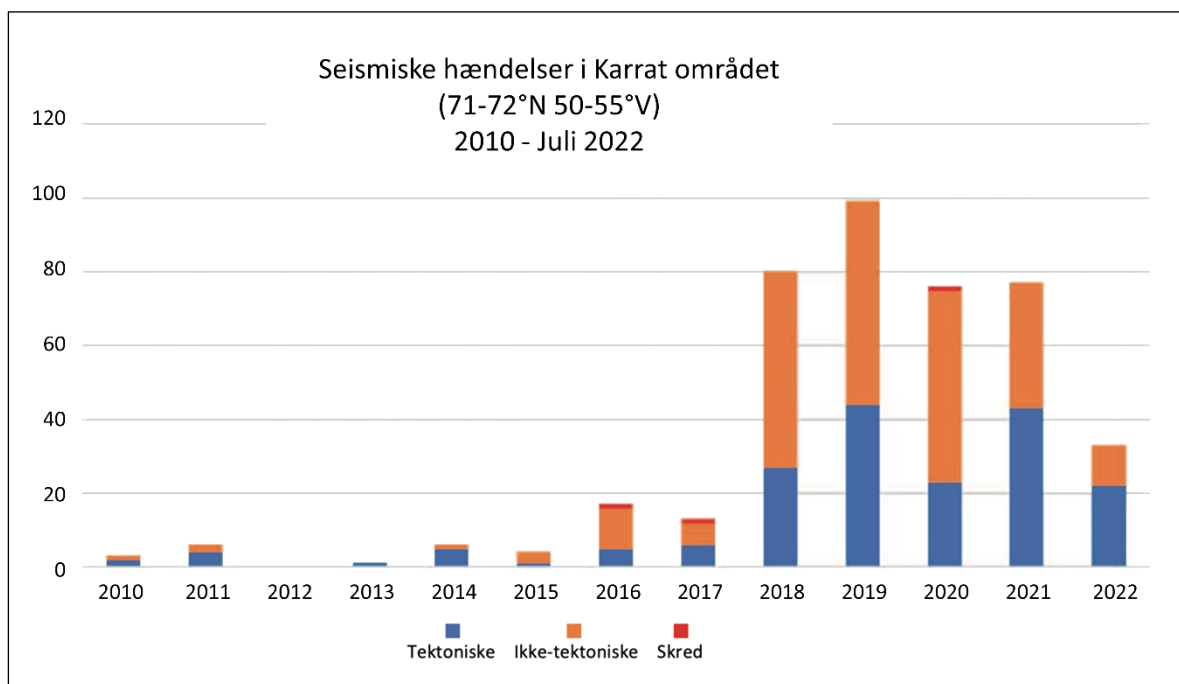
Det understreges, at risikoen forbundet med fjeldskred i Vaigat vil kunne ændre sig i løbet af kort tid. Der er flere tegn på, at kystskrånningerne i Vaigat befinder sig i et ustabil stadie pga. permafrostdegradering, og der er flere ustabile skrånninger som potentielt kan accelerere eller udvide sig til at omfatte større områder. Det anbefales derfor, at det prioriteres højt, at der foretages en periodisk screening hvert 1–2 år vha. InSAR-data og optiske satellitbilleder for alle kystskrånninger i Vaigat for at vurdere, om der er nye ustabile fjeldpartier under udvikling, samt for at monitorere udviklingen af allerede kendte ustabile skrånninger eller skredområder. Screeningen bør sammenholdes med opsamlet viden om de geologiske processer og skredhistorikken i området. Hvis screeningen viser en øgning af faren for

specifikke lokaliteter, anbefales det, at der følges op med feltbesøg og yderligere analyser for at bestemme mulige skredscenarier og deres risiko.

De tidligere fjeldskred og tsunamier samt nuværende ustabile skrånninger i Vaigat er beskrevet nærmere i GEUS Notat af 4. oktober 2022b.

Seismologi

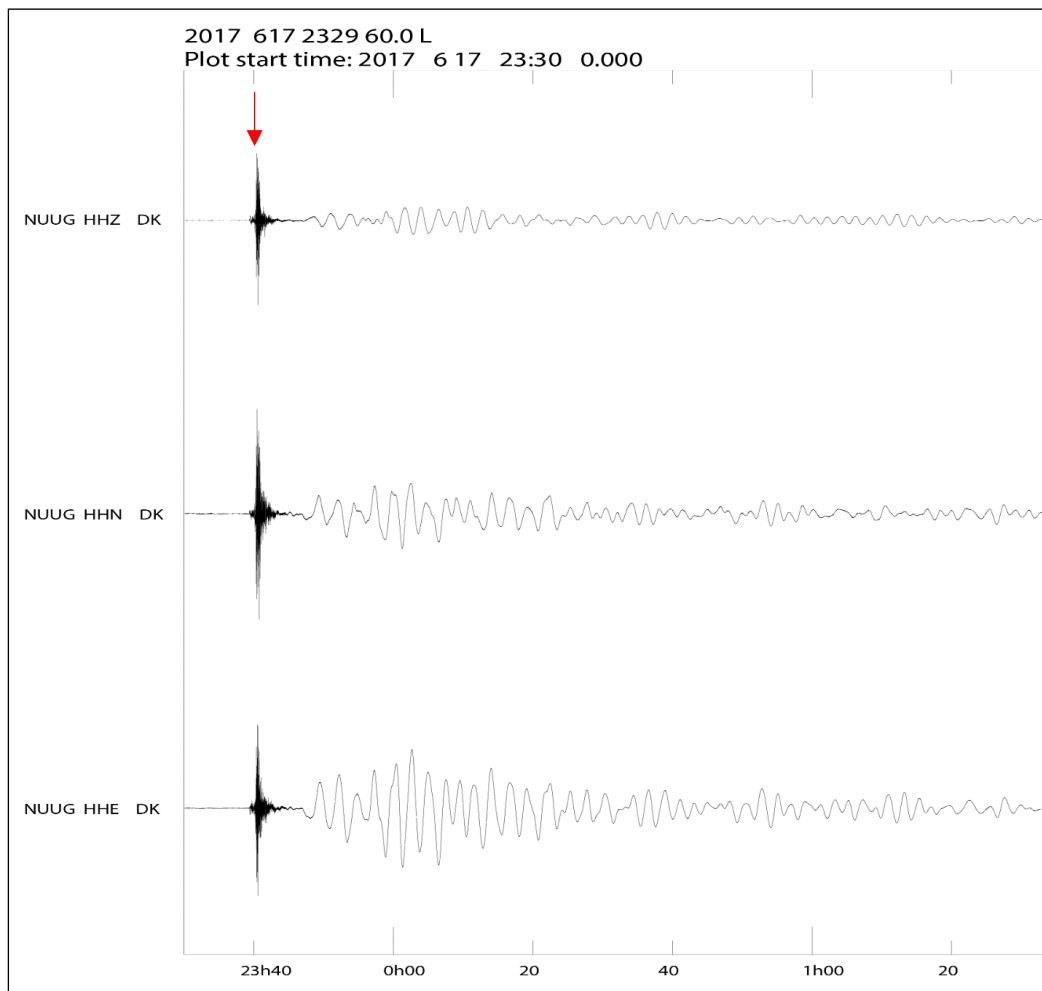
I løbet af Fjeldskredsprojektet har GEUS benyttet seismologiske data til at lokalisere og tidsbestemme rystelser i det centrale Vestgrønland (GEUS Notat af 4. oktober 2022d). Ved hjælp af undersøgelser af de seismologiske signaler er det muligt at skelne mellem tektoniske rystelser, som skyldes jordskælv, og ikke-tektoniske rystelser, som skyldes f.eks. gletsjerkælvninger og skred (Figur 18). Det seismologiske netværk i det centrale Vestgrønland er i perioden 2017–2019 blevet udvidet med fire nye målestationer, hvoraf en dog blev nedtaget pga. oversvømmelse. Udvidelsen af det seismologiske netværk har muliggjort en bedre lokalisering af rystelser i det centrale Vestgrønland, inklusiv Karrat fjorden. Med de nye målestationer lokaliseres der i højere grad ikke-tektoniske hændelser ved de store gletsjerudløb. De seismologiske data er ligeledes blevet brugt til tidsbestemme tre konfirmerede skredhændelser i Karrat området (Svennevig et al., 2019).



Figur 18: Histogram med antal tektoniske og ikke-tektoniske rystelser samt tre konfirmerede skredhændelser i 2016, 2017 og 2020. Efter opgraderingen af det seismologiske netværk fra 2017 er der registreret og lokaliseret langt flere rystelser i den centrale Vestgrønland.

Både fjeldskredet og tsunamien den 17. juni 2017 blev registreret på den seismiske målestation i Nuugaatsiaq (Figur 19). Fjeldskredet skabte jordrystelser svarende til et jordskælv på ca. M 4 (M er sammenlignelig med Richterskalaen). Da tsunamibølgerne efterfølgende ramte Nuugaatsiaq, blev der registreret en serie tydelige, langsomme svingninger, formentligt forårsaget af trykændringer ud for kysten, som fik seismometeret til

at tilte. Tsunamisignalet afviger så meget fra andre typer seismiske rystelser, at det sandsynligvis vil kunne genkendes af analysesoftware, hvilket potentielt kan danne grundlag for udvikling af et varslingsystem for tsunamier. Det vurderes dog, at det vil tage flere år, før der er udviklet et system som kan fungere med en høj grad af sikkerhed med et acceptabelt antal falske alarmer, og der er ikke nogen garanti for, at det kommer til at virke.



Figur 19: Data fra den seismologiske målestation i Nuugaatsiaq for to timer omkring fjeldskredet den 17. juni 2017. Signalet fra fjeldskredet er markeret med en rød pil. Efter 7,5 minut ses den første af en serie langsommere svingninger, som tolkes til at stamme fra tsunamien.

Klimamodellering

Degraderingen af permafrost kan ændre stabiliteten af de stejle skråninger langs Grønlands fjorde. Der er derfor benyttet klimamodellering og in situ-temperaturmålinger siden 2019 til at lave den første vurdering af permafrosten i stejle skråninger i det vestlige Grønland (GEUS Notat af 4. oktober 2022e).

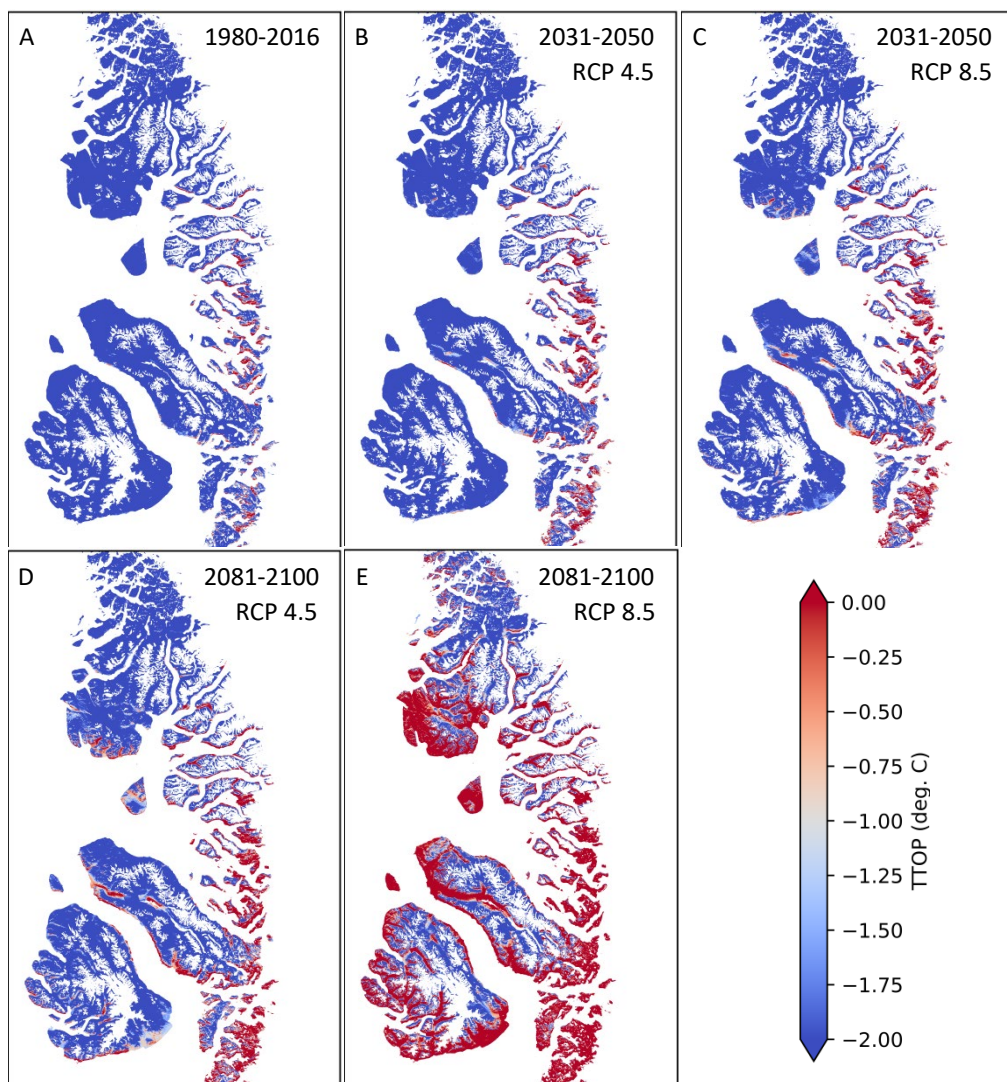
En regional klimamodel fra Danmarks Meteorologiske Institut (DMI) er brugt til at modellere den gennemsnitlige årlige lufttemperatur. DMI-modellen er først nedskaleret fra en opløsning på 5,5 x 5,5 km til 100 x 100 m, for at gøre den egnet til at studere stejle skråninger i kompleks topografi. In situ-temperaturmålinger er blevet indsamlet siden 2019 og brugt til at kalibrere modellen for effekten af den indkommende solstråling med tilhørende skygger og belysningsvinkel ved jordoverfladen. Til sidst er temperaturen i jordlagene over permafrosten estimeret ud fra en simpel konceptuel model, der relaterer lufttemperatur til jordoverflade- og undergrundstemperaturer.

Eksperimentelle og teoretiske studier indikerer, at stabiliteten af en skrånning med permafrost gradvist falder med stigende temperatur. Skrånningen er mest ustabil, når temperaturen er tæt på nul, men under smeltepunktet.

Den årlige gennemsnitstemperatur i jordlagene lige over permafrosten (TTOP) er modelleret for 1980–2016 samt for de to fremtidsscenarier 2031–2050 og 2081–2100. Resultaterne af klimamodelleringerne for Vestgrønland er opsummeret i Figur 20, hvor TTOP er inddelt i tre intervaller:

- lavere end -2°C (mørk blå) indikerer, at skråningerne gradvist bliver varmere eller potentielt mere ustabile, men har endnu ikke nået det mest ustabile niveau med hensyn til permafrostrelaterede effekter,
- -2°C – 0°C (blå-røde nuancer) indikerer, at skråningerne er i det temperaturinterval hvor de er mest ustabile,
- højere end 0°C (mørk rød) indikerer, at skråningerne bliver gradvist mere fri for permafrost.

Modelleringerne viser, at klimaet i perioden 1980–2016 har understøttet en stabil permafrost i det meste af Vestgrønland bortset fra sydvendte skråninger i den østligste del af regionen. Hvis lufttemperaturerne stiger som fremskrevet i klimascenarie RCP 4.5 (medium klimagaskoncentration i atmosfæren), vil der ske udbredt permafrostdegradering i en stor del af de sydvendte skråninger langs fjordene og ind mod randen af Grønlands indlandsis. Hvis temperaturerne stiger som fremskrevet i klimascenarie RCP 8.5 (højere klimagaskoncentration i atmosfæren), vil der ske permafrostdegradering i de fleste skråninger langs fjordene, inklusive nordvendte skråninger.



Figur 20. Modelleret gennemsnitstemperatur i jordlagene lige over permafrosten (TTOP) i Vestgrønland i perioden A) 1980–2016, B) 2031–2050 baseret på RCP 4.5 fremskrivning, C) 2031–2050 baseret på RCP 8.5 fremskrivning, D) 2081–2100 baseret på RCP 4.5 fremskrivning, E) 2081–2100 baseret på RCP 8.5 fremskrivning. Bemærk, at modellerne ikke forudsiger temperaturer i permafrosten dybt under jordoverfladen. En øgning af den modellerede TTOP skal dog forstås som en indikation af, at den igangværende opvarmning over tid vil bevirke, at permafrosten i dybden vil degradere og i sidste ende forsvinde. Skråningerne er mest ustabile ved -2°C – 0°C .

Vurdering af muligheder for monitorering og varsling

Som en del af Fjeldskredsprojektet har GEUS vurderet mulighederne for monitorering og varsling i Grønland (GEUS Notat af 28. juni 2021). Der er givet nogle specifikke anbefalinger for monitorering af Karrat 3 i GEUS Notat af 2. juli 2021, og disse er også gældende for Kigarsima. Konklusionerne er sammenfattet herunder.

Der findes ikke noget varslingssystem som er testet under så udfordrende forhold som de grønlandske. Den største udfordring er ikke installationen af de instrumenter med tilhørende strøm og datatransmission, som skal til for at etablere et monitoringsystem, men i højere grad udviklingen af det eller de systemer, som skal frembringe et varsel. GEUS vurderer, at det er usikkert, om det vil lykkes at etablere et velfungerende varslingssystem.

Der skelnes her mellem tsunamivarsling, som går ud på at detektere og varsle om en allerede udløst tsunami, og varsling af et potentielt fjeldskred, som handler om at varsle inden et fjeldskred sker.

Tsunamivarsling internationalt sker i dag ved hjælp af metoder, som alle ville involvere betydelig udvikling for at komme til at fungere i Grønland. GEUS vurderer, at der sandsynligvis vil kunne udvikles en metode til seismisk detektion og varsling af et tsunamisignal. Det er dog en udfordring, at der vil gå kort tid fra et fjeldskred sker til tsunamien rammer berørte bygder, hvorfor der må udvikles software som automatisk kan skelne mellem signal fra tsunami og andre seismiske signaler. Da dette arbejde involverer betydelig udvikling, er der ikke nogen garanti for, at det kommer til at virke.

GEUS vurderer endvidere, at det vil være vanskeligt at etablere et fagligt forsvarligt varslingssystem for fjeldskred, da det kræver et meget indgående kendskab til fjeldpartiets naturlige bevægelsesmønstre at kunne definere tærskelværdier for varsling med et acceptabelt antal falske alarmer. Varsling af et potentielt fjeldskred vil kræve en omfattende organisation og vil uundgåeligt medføre andre problemer i form af unødvendige evakueringer.

Overførsel af teknologi og kompetence til Grønland

Det er afgørende for det fremtidige arbejde med monitorering af ustabile fjeldpartier i Grønland, at der sker en systematisk vidensopbygning og lokal forankring af viden og kompetencer, således at f.eks. drift af monitoringsudstyr og dataanalyser kan udføres i Grønland.

Igennem den sidste del af fjeldskredsprojektet har GEUS haft flere møder med medarbejdere i Råstofdepartementet for at overføre viden om specifikke ustabile fjeldpartier i Grønland og fjeldskredsprocesser generelt, ligesom GEUS har bidraget til planlægningen af Råstofdepartementets feltindsats i 2022.

GEUS har ligeledes videregivet seks specialdesignede GNSS-instrumenter til monitorering af bevægelser i ustabile fjeldpartier i Uummannaq's fjordsystem, samt arrangeret at fire seismiske stationer, som er essentielle for arbejdet med udvikling af seismisk tsunamivarsling, kan fortsætte i drift under Råstofdepartementet efter 2022.

GEUS vil naturligvis gerne indgå i dialog med Grønlands Selvstyre om det videre arbejde med anbefalingerne om monitorering og varsling som er nævnt heri.

Konklusioner

GEUS har gennemført detaljerede undersøgelser af 18 lokaliteter, som var identificeret som potentielt kritiske i Screeningsundersøgelsen, samt yderligere et ustabil fjeldparti, som blev identificeret i løbet af Fjeldskredsprojektet. Tsunamimodelleringer er udført af Norges Geotekniske Institut.

Der er identificeret to fjeldpartier med høj risiko, Karrat 3 (nr. 5) og Kigarsima (nr. 19), der begge er beliggende i Uummannaqs fjordsystem. For disse er der udført detaljerede undersøgelser og tsunamimodelleringer. Tsunamimodelleringer viser, at i værste fald vil byen Uummannaq og alle bygderne Qaarsut, Niaqornat, Ukkusissat, Saattut, Ikerasak, Illorsuit og Nuugaatsiaq blive berørt af en tsunami genereret ved et fjeldskred fra Karrat 3. En tsunami genereret af fjeldskred fra Kigarsima vil især give opskyl i Qaarsut, Niaqornat og Ukkusissat.

Der er identificeret tre fjeldpartier med moderat risiko hvor de to, Paatuut Øst (nr. 14) og Illorsuaasaq (nr. 16) ligger i Vaigat, mens et, Qaarusuup Qaqqaa (nr. 18), ligger på Bjørneøen i Godthåbsfjorden.

Ved Paatuut Øst er der et stort volumen løse sedimenter af talus og colluvium, som er i hurtig bevægelse. Det ustabile område ligner geologisk og strukturelt de skråninger, hvorfra der er sket fem fjeldskred i Vaigat gennem de seneste 100 år. GEUS vurderer, at sedimentpakken vil kunne kollapse i et fjeldskred, men at et potentielt fjeldskred fra Paatuut Øst sandsynligvis ikke vil generere en større tsunami end den fra Paatuut i 2000.

De to andre fjeldpartier med moderat risiko, Illorsuaasaq i Vaigat og Qaarusuup Qaqqaa i Godthåbsfjorden er karakteriseret ved, at der er meget veludviklede strukturer, men ingen tegn på nylige bevægelser. Begge fjeldpartier ligger nær beboede områder, så risikoen vil øges, hvis de skulle begynde at bevæge sig.

De to fjeldpartier Karrat 1 og 2 (nr. 3 og 4) vurderes at have meget høj sandsynlighed for fjeldskred, men de udgør ingen risiko for beboede områder, så længe Illorsuit og Nuugaatsiaq er ubeboede.

Udviklingen af historiske og nuværende ustabile områder i Uummannaqs fjordsystem og Vaigat har vist, at dette er områder, hvor ustabile områder kan udvikle sig i løbet af få år, og hvor der højst sandsynligt også i fremtiden vil ske fjeldskred. Klimaforandringerne forventes at bidrage til yderligere ustabilitet i skråningerne i det centrale Vestgrønland.

Kystskråningerne i Vaigat strædet i det centrale Vestgrønland er præget af betydelig fjeldskredsaktivitet. Dog har ingen af de ustabile områder som er identificerede i dag, en størrelse eller en geometri, som indikerer, at et potentielt fjeldskred vil generere en større tsunami end den i 2000, som ikke forårsagede nogen skade på land i Saqqaaq.

Der er introduceret et risikoklassificeringssystem baseret på et tilpasset norsk system til risikoklassificering. Systemet er baseret på systematisk klassifikation af fare (lig sandsynlighed) og konsekvens. Fareklassen afhænger af forskellige kriterier for strukturer og

bevægelser i det ustabile fjeldparti. Konsekvensen estimeres ud fra det potentielle tab af menneskeliv i tsunamien opskylszone. Introduktionen af det tilpassede norske risikoklassificeringssystem har ikke ændret på tidligere vurderinger af risikoen forbundet med de undersøgte ustabile fjeldpartier.

Det vurderes, at der sandsynligvis vil kunne udvikles en metode til detektion og varsling ud fra et seismisk signal fra en tsunami. Det kan dog tage flere år, før der er udviklet et system som kan fungere med en høj grad af sikkerhed med et acceptabelt antal falske alarmer.

Vurderingerne af de syv ustabile fjeldpartier og de skredudsatte kystskrånninger i Uummannaqs fjordsystem og Vaigat er baseret på nuværende viden og data for bevægelser og skredstrukturer. Risikoniveauet for disse vil i nogle tilfælde med tiden kunne ændre sig. Det anbefales, at fem af de undersøgte ustabile fjeldpartier (nr. 5 Karrat 3, nr. 19 Kigarsima, nr. 14 Paatuut Øst, nr. 16 Illorsuaasaq og nr. 18 Qaarusuup Qaqqaa) monitoreres og genvurderes løbende, samt at der foretages regionale screeninger vha. satellitdata for alle kystskrånninger i Uummannaqs fjordsystem og Vaigat.

For de dele af Grønland, hvor der ikke for nuværende er kortlagt nogen risiko forbundet med fjeldskred og tsunamier, vil der kunne blive opdaget nye ustabile fjeldpartier. Det anbefales derfor, at der er en generel opmærksomhed på skred langs kysterne i hele Grønland, og at eventuelle nyopdagede ustabile fjeldpartier undersøges med henblik på at vurdere deres risiko.

Det er ikke muligt at forudsige, hvornår eller præcis hvor de næste fjeldskred vil forekomme. Det er ligeledes ikke muligt at forudsige præcis, hvor store kommende fjeldskred vil være, om de vil generere tsunamier, og hvilke konsekvenser de vil have. De præsenterede vurderinger er de bedst mulige ud fra nuværende data og viden.

Referencer

- Dahl-Jensen, T., Larsen, L. M., Pedersen, S. A. S., Pedersen, J., Jepsen, H. F., Pedersen, G. K., Nielsen, T., Pedersen, A. K., Von Platen-Hallermund, F., Weng, W. L., 2004. Landslide and tsunami 21 November 2000 in Paatuut, West Greenland. *Nat. Hazards* 31, 277–287.
- GEUS Notat om risikoklassificering af ustabile fjeldpartier i Karrat og Kigarsima, Uummannaqs fjordsystem, 4. oktober 2022a.
- GEUS Notat om risiko for fjeldskred og tsunamibølger i Vaigat, 4. oktober 2022b.
- GEUS Notat om analyse af GNSS-data i Karrat 3 2021–2022, 4. oktober 2022c.
- GEUS Notat om analyse af seismologiske data i det centrale Vestgrønland 2017–2022, 4. oktober 2022d.
- GEUS Report on climate and bedrock permafrost degradation modelling, 4. oktober 2022e.
- GEUS Notat om risiko ved en tsunami udløst af et fjeldskred fra Karrat fjorden i Uummannaqs fjordsystem – opdaterede opskylskurver per august 2022, 4. august 2022.
- GEUS Notat om risiko for beboede områder ved en tsunami udløst af et fjeldskred fra lokaliteten Kigarsima i Uummannaqs fjordsystem, 14. juni 2022.
- GEUS Notat om risiko for et alvorligt fjeldskred fra lokaliteten Kigarsima i Uummannaqs fjordsystem, 8. april 2022.
- GEUS Notat om vurdering og anbefaling af muligheder for monitoring og varsling af tsunami og fjeldskred ved Karrat 3, 2. juli 2022.
- GEUS Notat om mulighederne for varsling af tsunami eller fjeldskred i Grønland, 28. juni 2021.
- GEUS Notat om risiko for fjeldskred og tsunamibølger i Uummannaqs fjordsystem – status for faglig viden marts 2021, 29. marts 2021.
- GEUS Notat om risiko for fjeldskred og tsunamibølger i Karrat Fjorden – status for faglig viden oktober 2020, 9. oktober 2020.
- Hermanns, R. L., Oppikofer, T., Anda, E., Blikra, L. H., Böhme, M., Bunkholt, H., Crosta, G. B., Dahle, H., Devoli, G., Fischer, L., Jaboyedoff, M., Loew, S., Sätre, S., Molina, F. Y. Recommended hazard and risk classification system for large unstable rock slopes in Norway, NGU report 2012.09, Geological Survey of Norway, Trondheim, Norway.
- NGI Report 20210737-02-R: Tsunami hazard analysis in Greenland. Tsunami simulations in the Vaigat Sound, 2. september 2022.
- NGI Report no 20210737-01-R: Tsunami hazard analysis in Greenland. Runup modelling of potential tsunamis from Kigarsima, 13. juni 2022.
- NGI Report no 20200823-01-R: Tsunami hazard screening for Uummannaq fjord system – Greenland. Hazard scenario simulations and 2017 event hindcast, 26. marts 2021.
- Oppikofer, T., Hermanns, R. L., Roberts, N. J., Böhme, M., 2018. SPLASH: semi-empirical prediction of landslide-generated displacement wave run-up heights. Fra: Lintern et al. (eds). *Subaqueous Mass Movements*. Geological Society, London, Special Publications, 477, <https://doi.org/10.1144/SP477.1>.
- Porter C., et al., 2018. "ArcticDEM", <https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH>, Harvard Dataverse, V1.
- Pedersen, S. A. S., Melchior Larsen, L., Dahl-Jensen, T., Jepsen, H. F., Pedersen, G. K., Nielsen, T., Pedersen, A. K., von Platen-Hallermund, F., Weng, W., 2002. Tsunami-generating rock fall and landslide on the south coast of Nuussuaq, central West Greenland. *Geology of Greenland Survey Bulletin* 191, 73–83.
- Svennevig, K., Owen, M., Citterio, M., Nielsen, T., Rosing, S., Harff, J., Endler, R., Morlighem, M., Rignot, E., in prep., 2022a. Holocene giga-scale rock avalanches in the Vaigat strait, West Greenland.

Svennevig, K., Keiding, M., Korsgård, N.J., Lucas, A., Morino, C., Owen, M., Poulsen, M.P., Priebe, J., Sørensen, E.V., in prep., 2022b. Uncovering a 70-year-old permafrost degradation induced disaster in the Arctic, the 1952 Niiortuut landslide-tsunami in central West Greenland.

Svennevig, K., Hermanns, R. L., Keiding, M., Binder, D., Citterio, M., Dahl-Jensen, T., Mertl, S., Sørensen, E. V., Voss, P. H., 2022. A large frozen debris avalanche entraining warming permafrost ground- the June 2021 Assapaat landslide, West Greenland. *Landslides*. <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01922-7>.

Svennevig, K., Dahl-Jensen, T., Keiding, M., Boncori, J.P.M., Larsen, T., Salehi, S., Solgaard, A.M., Voss, P.H., 2020. Evolution of events before and after the 17 June 2017 rock avalanche at Karrat Fjord, West Greenland – a multidisciplinary approach to detecting and locating unstable rock slopes in a remote Arctic area. *Earth Surface Dynamics*. 8, 1021–1038. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/esurf-8-1021-2020>.

Svennevig, K., Keiding, M. 2020. En dansk nomenklatur for landskred. *Geologisk Tidsskrift* 2020, 19–30.

Svennevig, K., Solgaard, A. M., Salehi, S., Dahl-Jensen, T. Merryman Boncori, J. P., Larsen, T. B., Voss, P. H., 2019. A multidisciplinary approach to landslide monitoring in the Arctic: Case study of the March 2018 ML 1.9 seismic event near the Karrat 2017 landslide. *GEUS Bulletin* 43.

Svennevig, K., 2019. Preliminary landslide mapping in Greenland. *GEUS Bulletin Vol* 43. <https://doi.org/10.34194/GEUSB-201943-02-07>.