

GEUS notat om mulighederne for varsling af tsunami eller fjeldskred i Grønland

Indholdsfortegnelse

1. Indledning	1
2. Sammendrag	2
3. Forudsætninger for etablering af varslingsystem	2
4. Tsunamivarsling	3
4.1 Metoder	3
4.2 Erfaringer fra udlandet	6
4.3 Potentiale og udfordringer for brug i Grønland	7
4.4 Tekniske løsninger og pris for etablering og drift	8
5. Varsling af potentielt fjeldskred	9
5.1 Metoder	10
5.2 Erfaringer fra udlandet (Norge og Schweiz)	14
5.3 Potentiale og udfordringer for anvendelse i Grønland	15
5.4 Tekniske løsninger og pris for etablering og drift	16
6. Muligheder for evakuering og selvevakuering	16
7. Afsluttende kommentarer og konklusioner	17
7.1 Tsunamivarsling	17
7.2 Varsling af potentielt fjeldskred	17

1. Indledning

Nærværende notat om mulighederne for varsling af tsunami eller fjeldskred i Grønland er en del af projektet "Undersøgelse af risiko for alvorlige fjeldskred i Grønland", som afsluttes i Q3 2022. I november 2020 blev det på opfordring fra Departementet for Forskning og Miljø besluttet at fremskynde denne del af projektet, så den kunne leveres i Q3 2021.

Efterfølgende har GEUS så meddelt at man vil levere notatet med udgangen af Q2.

Denne redegørelse omfatter en vurdering af mulige monitorings- og varslingsystemer af tsunami/fjeldskred i Grønland. Med **monitoringssystem** forstås det system af sensorer, som indsamler og eventuelt transmitterer data om f.eks. tsunamibølger eller bevægelser i et ustabil fjeldparti. Med **varslingsystem** forstås det system, som ud fra data detekterer et eventuelt signal, vurderer signalet og eventuelt udsender et varsel.

De heri beskrevne varslingsystemer kan overordnet deles ind i to typer:

1. tsunamivarsling
2. varsling af potentielt fjeldskred.

Den første type kendes fra Stillehavet og Alaska og er baseret på målinger af jordrustelser og vandstandsændringer. Den anden type kendes primært fra Norge og Schweiz og er baseret på monitoring af bevægelser og potentiel acceleration i det ustabile fjeldparti. Nærværende redegørelse omfatter en beskrivelse af kendte metoder samt deres muligheder og udfordringer for brug i Grønland generelt.

2. Sammendrag

Der findes ikke noget varslingsystem, 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 monitoringssystem, men i højere grad udviklingen af det eller de systemer, som skal frembringe et varsel. GEUS' vurdering er, at det er usikkert, om det vil lykkes at etablere et velfungerende varslingsystem.

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 varslingsystem 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. Det kan overvejes at iværksætte periodisk monitoring af en eller flere ustabile fjeldpartier, for at få en bedre forståelse af mulige scenarier og deres sandsynlighed.

3. Forudsætninger for etablering af varslingsystem

Begge typer varslingsystemer forudsætter en stabil kommunikationslinje til at transmittere data fra instrumenterne på lokaliteten. Datatransmission kan ske via radio, mobilnetværk eller satellit, og stabiliteten af kommunikationen kan øges ved at etablere redundante systemer. Radio og mobilnetværk kræver installationer på land, hvilket er dyrt, men vil sandsynligvis være billigere i drift. Satellittransmission fra faste installationer som klimastationer og seismiske stationer kan i dag gøres via Iridium, som f.eks. bruges til at

transmittere data fra de seismiske stationer i GLISN-netværket. I Grønland har TELE-POST stor erfaring med mulighederne for at etablere stabil kommunikation til en given lokalitet.

Der er brug for strøm til at drive instrumenterne samt til transmission af data. Der eksisterer gennemprøvede systemer med strømforsyning til instrumenter i arktiske egne. For eksempel kan en vejrstation (uden datatransmission) forsynes med strøm året rundt med en 40 kg batteripakke og et mindre solpanel. Til lidt mere strømkrævende instrumenter, som f.eks. GNET GNSS-stationer, installeres typisk et antal solpaneler og/eller vindmøller. De mest strømkrævende instrumenter kan få strøm fra brændselsceller, som potentielt kan levere en kraftig strømkilde med begrænset vedligehold. Der har i de sidste år været eksperimenteret med metan-brændselsceller i kombination med batterier og vindmøller i Zackenberg, og det ser lovende ud, men det kan være en udfordring at undgå, at metanen fryser.

En anden forudsætning for driften af et varslingsystem er, at der er en teknisk vagtordning og logistik som sikrer løbende tilsyn og vedligehold af monitoringsystemet, samt bemanning til tolkning af data og løbende videreudvikling af varslingsystemet.

4. Tsunamivarsling

En tsunami dannes, når store vandmasser pludselig forflyttes. Det kan ske ved et jordskælv, hvor en forkastning bryder havbunden, eller ved et fjeldskred, hvor skredmasserne rammer vandet og aflejres på havbunden. En tsunamibølge adskiller sig fra en vinddreven bølge eller dønning ved at strække sig gennem hele vandsøjlen, hvorimod vinddrevene bølger og dønninger aftager med dybden. Dette har betydning for den hastighed, en tsunami udbreder sig med, samt hvor langt væk den bevarer sin energi – den udbreder sig længere og hurtigere end vinddrevene bølger. En tsunamibølges hastighed afhænger desuden af vanddybden; jo dybere vand, des hurtigere udbreder den sig. Dette afsnit handler om mulighederne for at detektere, vurdere og varsle en tsunami dannet ved fjeldskred.

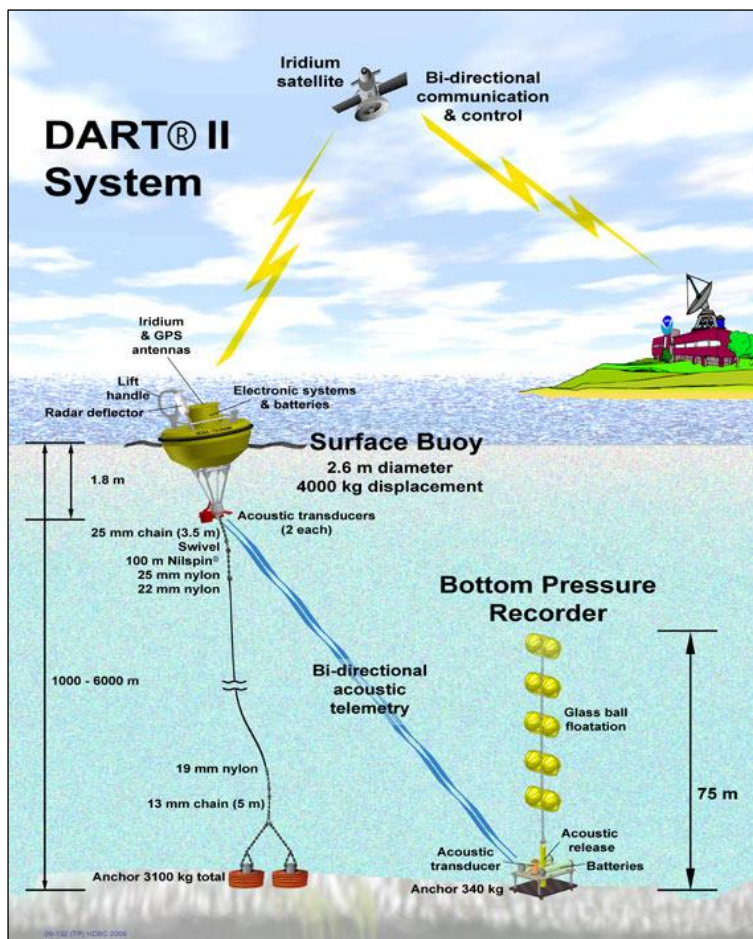
4.1 Metoder

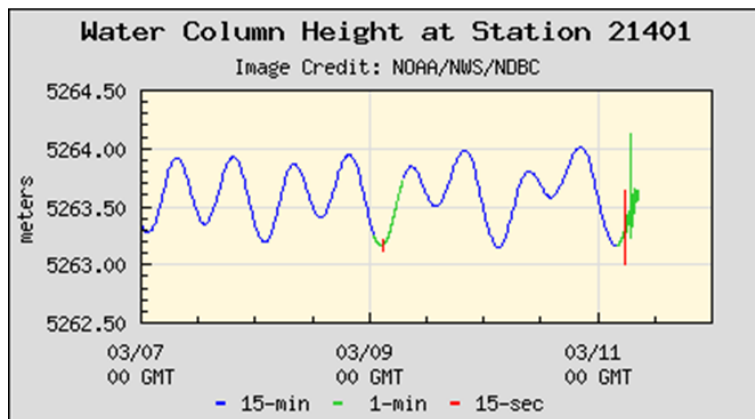
Fjeldskred og tsunamier udsender fysiske signaler i undergrunden, i vandet og i luften. Tsunamivarslingssystemer er baseret på detektion og vurdering af disse signaler. Et fjeldskred genererer rystelser i undergrunden og støj. For eksempel skabte Karrat 2017 skredet jordrystelser svarende til et jordskælv på ca. M 4 (sammenligneligt med Richterskalaen), som kunne registreres på seismiske stationer på store dele af jordkloden, inklusiv de lokale stationer i Uummanaq fjordsystemet. Øjenvidner til 2017 skredet berettede desuden om et kraftigt brag, da fjeldskredet skete. Tsunamibølger genererer både havniveauændringer og seismiske signaler. Tsunamibølger dannet ved fjeldskred kan nå ekstreme højder. For eksempel var bølgerne fra 2017 fjeldskredet op mod 100 m høje lokalt i Karratfjorden, hvor fjeldskredet skete. Nedenfor er forskellige metoder til detektion af fjeldskred og tsunami beskrevet med udgangspunkt i deres anvendelighed i fjerntliggende fjordsystemer med havis om vinteren. Et varslingsystem bør om muligt baseres på to eller flere af de beskrevne metoder afhængigt af lokale forhold.

Seismiske stationer: Et netværk af seismiske bredbåndssensorer kan detektere signaler fra både fjeldskred og tsunami. De fleste tektoniske jordskælv af en vis størrelse bliver

lokaliseret af internationale seismologiske tjenester inden for få minutter. Jordrystelserne fra et fjeldskred adskiller sig dog fra tektoniske jordskælv, men der er endnu ikke udviklet analysesoftware som automatisk kan skelne fjeldskred fra andre seismiske hændelser som jordskælv og isskælv. En tsunamibølges signal vil til gengæld kunne genkendes, både fordi perioden (dvs. bølgelængden) af signalet er bestemt af geografien i området, og fordi amplituden (dvs. størrelsen) af signalet er stor. På den seismiske station i Nuugaatsiaq var der i 2017 tydelige signaler fra tsunamibølgerne, formentligt forårsaget af trykændringer ud for kysten, som fik seismometeret til at tilte.

Tryksensorer: Vandstandsændringerne forårsaget af en tsunami vil kunne detekteres med tryksensorer på havbunden. Metoden er meget brugt i internationale tsunamivarslingssystemer, hvor tryksensorer på havbunden transmitterer data via akustisk signal til bøjer på havoverfladen, selvstændigt forankret på havbunden, eller hvis muligt med et kabel op på land. Tryksensorerne er typisk forsynet med en flydeanordning, som bruges til at hæve instrumenterne op til overfladen for vedligehold (figur 1).

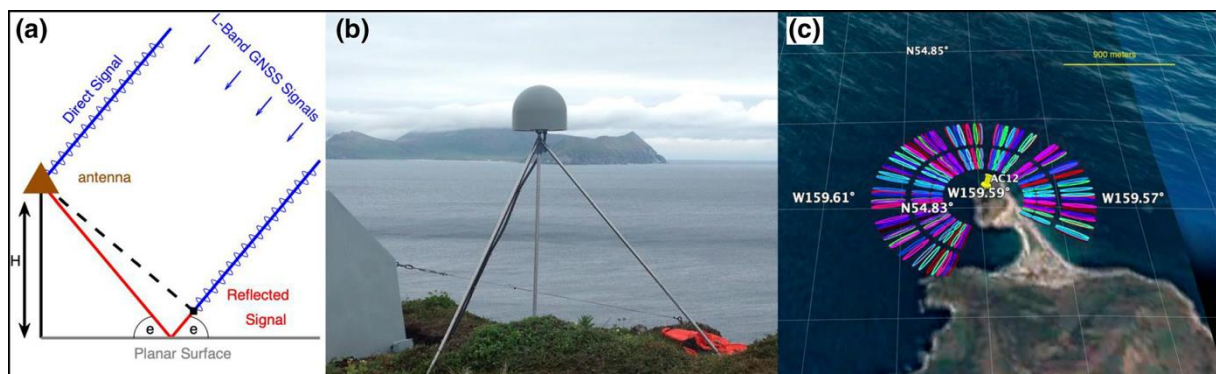




Figur 1. Skitse af måler og bølge samt et eksempel på målte data fra dagene omkring jordskælvet i Japan 2011. Den almindelige tidevandsvariation er aftegnet med blåt. Passage af to tsunamibølger er i grønt, med en markering i rød ved den første detektion af en tsunamipassage. Den første (9. marts 2011) er et forskælv til tsunamien fra det store jordskælv i Japan 11. marts 2011. Kilde: DART.

Vandstandsmålere: Disse kan også registrere ændringer i vandniveau, og bruges f.eks. i det Indiske Ocean som supplement til andre datakilder, men kan ikke stå alene. Desuden vil vandstandsmålere ved en kyst være eksponeret til is og vil være meget udsatte i tilfælde af en tsunami.

GNSS-IR: Det er muligt at detektere vandstandsændringer ved hjælp af GNSS-stationer som måler refleksionen fra havoverfladen (såkaldt GNSS Interferometric Reflectometry eller GNSS-IR). Her udnytter man, at signalet fra GNSS-satellitterne måles både direkte og ved refleksion fra havoverfladen. GNSS-stationerne skal være monteret højt på fjeldtoppe med udsigt til havoverfladen (figur 2). Den tid, det tager for det reflekterede signal at komme frem til GNSS-stationen, afhænger af afstanden mellem havoverfladen og GNSS-antennen, dvs. af højden af havoverfladen. Kristine Larson, professor emerita, Univ. of Colorado vurderer, at metoden vil kunne udvikles til detektion af en tsunamibølge (K. Larson, M. A. Karegar og T. Dittmann, pers. kommunikation). Metoden bruges i dag til at måle tidevand, men er stadig under udvikling i forbindelse med detektion af tsunamier.



Figur 2: Illustration af princippet i GNSS-IR metoden. a) Viser hvordan GNSS-signalet reflekteres på havoverfladen. b) En GNSS-antenne med udsigt til havoverfladen. c) Skitse som illustrerer måleområdet for en GNSS-IR-station. Kilde: Larson et al., 2021, <https://doi.org/10.1029/2020GL091378>.

Tabel 1: Sensorer til detektion af fjeldskred og tsunami

Sensortype	Tidslig opløsning	Præcision	Ulemper /begrænsninger	Strømforbrug*	Datatransmission	Pris inkl. strømkilde**
Seismologisk bredbåndssensor	Millisekunder	km	Kræver udvikling	Ca. 2 W	30 MB per dag (100 Hz data på 3 kanaler)	Sensor og datalogger 400 000 kr. Der bør være mindst to stationer.
Tryksensor på havbunden	Sekunder	mm	Kostbar installation	?	< 1 MB per dag (1 Hz data)	Ukendt men formentligt tocifret millionbeløb
Vandstandsmålere ved kysten	Sekunder	mm	Isudsatte	?	< 1 MB pr dag (1 Hz data)	Måler nogle tusinde kr, Installation ukendt, hvis overhovedet muligt.
GNSS-IR	Sekunder/minutter	cm	Kræver udvikling	4,5 W	< 1 MB per dag (1 Hz data)	450 000 kr per styk. Der bør installeres mindst to.
* Strømforbrug til at drive instrumenterne, ikke til transmission af data. ** I prisestimerne er medregnet omtrentlig udgift til installation, men ikke til mobilisering til lokalitet.						

4.2 Erfaringer fra udlandet

Varsling af jordskælvgenererede tsunamier tager udgangspunkt i realtidlokalisering af jordskælv, som foregår flere steder i verden. Store, overfladenære undersøiske jordskælv som frygtes at udløse en tsunami, giver anledning til et varsel, som bliver fulgt op med målinger på tryksensorer på havbunden i DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis) systemet, installeret i f.eks. Stillehavet og Det Indiske Ocean. Tryksensorerne i DART sender i udgangspunkt data hvert 15. minut, men ved detektion af anomalt havniveau, slås der automatisk om til at sende hvert 15. sekund. For Indonesien vurderes det, at der går en time fra et stort jordskælv detekteres, til den første tsunamibølge ankommer (se figur 3). Systemet i Stillehavet har været i funktion i årtier, og har varslet mange tsunamier, f.eks. tsunamien efter mega-jordskælvet i Japan i marts 2011. Fra et jordskælv, der vurderes farligt, sker, til et første tsunamivarsel udelukkende baseret på information om jordskælvet sendes ud, går der 5–15 min. Det følges op med yderligere og mere detaljeret information, når data fra f.eks. DART-bøjer kommer ind, og beregninger af jordskælvets bevægelser finder sted. Varsler og information sendes offentligt ud, og beslutninger om handlinger ligger hos de enkelte landes myndigheder.



Figur 3: Tidsforløb fra detektion af et stort jordskælv til evakuering af befolkningen i Indonesien. Et automatisk system præsenterer data og simulationer, og på basis af dette træffes beslutning af vagtpersonale om udsendelse af varsel. Kilde: GFZ.

Der har siden 2020 været et arbejde i gang for at etablere et tsunamivarslingsystem ved et ustabil fjeldparti i Barry Arm, Alaska (61,15°N, 148,15°W), hvor forholdene på nogle måder ligner dem i Grønland. Barry Arm fjeldpartiet er meget stort på 0,5 kubikkilometer, svarende til volumen af Karrat 3, og ligger over en tilbagetrækkende gletsjer, som munder ud i en fjord. En eventuel tsunami udløst af et fjeldskred fra Barry Arm kunne være ødelæggende for byen Whittier med 200 indbyggere ca. 50 km væk. Der er indtil videre installeret seismometre og vandstandsmålere, samt infralydsensorer til monitorering af bevægelser i det ustabile fjeldparti. Der er pt. ikke et fungerende varslingsystem, og derfor ingen erfaringer med om det virker. En væsentlig forskel ved Barry Arm sammenlignet med grønlandske forhold er, at Barry Arm ligger ca. 10 breddegrader sydligere end de ustabile fjeldpartier i Grønland, hvorfor der ikke er sammenhængende isdække i fjorden om vinteren.

4.3 Potentiale og udfordringer for brug i Grønland

En udfordring for tsunamivarsling i Grønland er, at der i mange tilfælde vil være kort tid fra et fjeldskred sker, til første bølge rammer. Tidsintervallet til at få detekteret, vurderet, varslet og alarmeret efter f.eks. et fjeldskred ved Karrat er mellem nogle få minutter og omkring en halv time (NGI rapport om tsunamimodellering, 2021). For at sikre mest mulig tid til at evakuere indbyggere må processen fra detektion til alarmering foregå automatisk, hvilket stiller store krav til udvikling af systemet, samt uundgåeligt øger risikoen for falske alarmer. Af denne grund vil nærværende redegørelse indeholde en beskrivelse af metoder til at frembringe et automatisk varsel baseret på detektion af tsunamibølge, med et acceptabelt antal falske alarmer.

Rystelser fra store fjeldskred er kraftige og registreres på seismiske stationer over store afstande. Udfordringen med at bruge detektion af disse rystelser til et varsel er, at de internationale jordskælvscentre ikke automatisk genkender signaler fra fjeldskred og derfor ikke hurtigt lokaliserer, hvor rystelserne stammer fra. På nærliggende stationer kan signaler fra et skred forveksles med signaler fra store fjerne jordskælv. GEUS har i forbindelse med

Fjeldskredsprojektet etableret et sideløbende forskningsprojekt, som har som mål at udvikle en metode til at skelne mellem fjeldskred, isskælv og tektoniske jordskælv, men der er endnu lang vej, før der vil findes et automatisk system uden risiko for mange falske detektioner.

Et seismisk system til automatisk detektion af tsunamibølgen vil sandsynligvis kunne udvikles, da tsunamisignalet på flere måder afviger fra andre seismiske signaler. Denne metode er anbefalet af og diskuteret med vores seismologiske kollegaer ved ETH i Schweiz. Sammenlignet med internationale tsunamivarslingssystemer er der dog meget begrænsede data til at øve systemet med i Grønland, hvorfor det sandsynligvis vil tage flere år, før der er udviklet et system som kan fungere med en høj grad af sikkerhed. F.eks. er det seismiske signal fra tsunamien fra 2017 kun kendt fra stationen i Nuugaatsiaq, og denne station er derfor vigtig i udviklingen af et system for dette område. For andre områder i Grønland, hvor der ikke findes seismiske målinger af en tsunami, kræves yderligere arbejde for at kunne detektere en tsunami.

Tryksensorer på havbunden vil kunne bruges til automatisk detektion af tsunamibølger. Andre ændringer af vandniveauet vil kunne udelukkes med rimelig sikkerhed, da variationerne ved f.eks. tidevand er kendte, og bølger fra kælvende isbjerge kan udelukkes ved at kræve, at den detekterede bølge er stor (f.eks. over 20 m), og at signalet er detekteret på mere end én sensor. I Grønland kompliceres metoden dog ved, at selve tryksensoren kan skades af dybtgående isbjerge, og ved, at signalet skal fra havbunden op på land, idet det ikke er muligt at bruge bøjer pga. havis og isbjerge. Det betyder, at tryksensoren må forbindes med et kabel til en modtager på land, og at kablet skal beskyttes både på havbunden mod isbjerge, og ved overgang op på land mod havis – og langt op på land, da modtageren skal kunne overleve en stor tsunami. Der vil derfor være en betydelig udgift ved at etablere denne type sensor i Grønland.

GNSS-IR-målinger af havniveau er analyseret i adskillige publikationer, men metoden indgår i dag ikke direkte i detektion og varsling af tsunamier. Forskere bl.a. på DTU arbejder med denne type data fra et netværk af GNSS-stationer (GNET), men ikke i realtid. Der er ligeledes netop bevilget et femårigt forskningsprojekt om GNSS-IR til detektion af geofare i USA og Grønland. GEUS har kontakt til internationale forskningsgrupper der arbejder med denne type analyser i realtid. Såfremt det lykkes at udvikle en metode der viser sig at fungere for tsunamibølger, vil GNSS-IR have den store fordel i Grønland, at den udelukkende kræver installationer på land, hvorved udfordringer pga. havis og isbjerge undgås.

4.4 Tekniske løsninger og pris for etablering og drift

Det er vanskeligt at vurdere de tekniske løsninger og deres pris, idet der udover installationer og drift også indgår udviklingsarbejde.

Detektion af det seismiske signal fra en tsunami vil kræve udvikling af analyse- og evalueringssoftware, der kan iværksættes umiddelbart, baseret på data fra stationen i Nuugaatsiaq. Detektionen skal testes på historiske data, så systemet ikke udløser (for mange) falske alarmer. Detektion af de direkte rystelser fra et fjeldskred vil kræve udvikling af analyseværktøjer der kan skelne mellem tektoniske jordskælv, isskælv og signaler fra fjeldskred. Et sådant forskningsarbejde er i gang ved GEUS, men det viser sig, at der er mange lighedspunkter mellem de seismiske signaler fra isskælv og rystelser fra et fjeldskred,

hvilket betyder, at der er lang vej til et analyseværktøj der automatisk kan detektere om rystelser kommer fra et fjeldskred. Et seismisk system vil kræve installation af 2–3 seismiske stationer i nærheden af de områder som monitoreres. Indkøb af udstyr, installation, udvikling af software og drift de første to år estimeres til at koste 20–30 mio. kr.

Et system af tryksensorer på havbunden vil koste et tocifret millionbeløb, idet det vil kræve kostbare installationer at sikre, at selve sensorerne samt installationen til transmission af data op på land ikke ødelægges af isbjerge, havis eller tsunami. Man kan forestille sig, at sensorerne på havbunden må forbindes med kabler i borehuller til en modtager på land. Der skal også findes en løsning, som sikrer, at tryksensorerne kan vedligeholdes uden de traditionelle flydeanordninger, som rager 75 meter op fra havbunden (se figur 1).

Udvikling af analysesoftware og evalueringssoftware for GNSS-IR vurderes til at tage minimum 2–3 år, idet data fra de relevante områder først skal samles ind, hvilket betyder, at instrumenterne skal sættes op først. I GNET ligger der en GNSS-station i Qaarsut, som var i drift ved 2017 skredet, og der findes data som vil kunne bruges i udviklingsarbejdet. Udvikling af dette system må indledningsvis betragtes som et forskningsprojekt med en ukendt udgift på måske et tocifret millionbeløb.

5. Varsling af potentielt fjeldskred

Denne type varslingsystem er baseret på det forhold, at der næsten altid vil ske en acceleration af bevægelserne i et ustabil fjeldparti op til et større fjeldskred. Det er derfor muligt at etablere et varslingsystem baseret på monitoring af bevægelserne i det ustabile fjeldparti.

Forud for etableringen af et sådant varslingsystem er det nødvendigt med grundige undersøgelser af fjeldpartiets strukturer og bevægelsesmønstre for at definere mulige scenarier og deres individuelle sandsynlighed, også kaldet faregrad. Derudover er det nødvendigt at kende fjeldpartiets typiske variationer over tid. Ustabile fjeldpartier kan i perioder bevæge sig hurtigere end normalt, uden at det fører til fjeldskred. En vigtig forudsætning for at kunne definere tærskelværdier for varsling er derfor en detaljeret og længerevarende monitoring af det ustabile fjeldparti. Med et godt kendskab til fjeldpartiets bevægelsesmønstre og typiske variationer vil man kunne definere et trafiklyssystem, som definerer faregraden som f.eks. grøn–gul–orange–rød, hvor rød svarer til højeste faregrad som typisk udløser evakuering. I figur 4 er det norske trafiklyssystem for fjeldskredsvarsling beskrevet.

Lav fare (grøn)	Det ustabile fjeldparti er i langvarig (flerårig) og jævn bevægelse (mm til cm per år). Bevægelserne kan udvise sæsonvariationer som følge af varierende vandtilførsel eller temperatur. Et fjeldskred inden for nær fremtid (typisk defineret som flere måneder) er mindre sandsynligt.
Moderat fare (gul)	Bevægelserne i det ustabile fjeldparti har passeret en tærskelværdi over de typiske sæsonvariationer og forventes at vise en svag acceleration. Der kan være en øgning i småskred. Sandsynligheden for et større fjeldskred i nær fremtid er øget. Beredskabet skal være dimensioneret til at håndtere et fjeldskred om én måned.
Høj fare (orange)	Bevægelserne i det ustabile fjeldparti har øget over en ny tærskelværdi og forventes at vise en klar acceleration. Der kan være en tydelig øgning i småskred. Et fjeldskred i nær fremtid er sandsynlig. Beredskabet skal være dimensioneret til at håndtere et fjeldskred om to uger.
Ekstrem fare (rød)	Bevægelserne har nået et niveau som tilsiger, at fjeldskred er meget sandsynligt og nært forestående. Der forventes stor uro og daglige småskred, hvilket kan føre til, at dele af monitoringsystemet bliver sat ud af spil. Beredskabet skal være dimensioneret til at håndtere et fjeldskred om 72 timer, og evakuering af hele fareområdet skal kunne gennemføres i løbet af 12 timer.

Figur 4. Illustration af faregrad og tilhørende dimensionering af beredskab for varsling af fjeldskred i Norge. Kilde: Norges Vassdrags- og Energidirektorat (NVE).

5.1 Metoder

Et monitoringsystem (også kaldet overvågningssystem) for et ustabil fjeldparti vil benytte forskellige typer sensorer, for at opnå en tilstrækkelig opløsning i tid og rum, samt for at sikre at observationer af bevægelser og acceleration kan bekræftes af hinanden uafhængige data. Monitoringen kan enten være periodisk eller kontinuerlig. Ved periodisk monitoring sker indsamling af data f.eks. en eller flere gange om året. Ved kontinuerlig monitoring indsamles og transmitteres data løbende. Etableringen af et varslingsystem forudsætter kontinuerlig monitoring med realtidsdatatransmission. Nedenfor er forskellige typer sensorer beskrevet med udgangspunkt i deres anvendelighed til kontinuerlig monitoring i fjerntliggende egne med udfordrende klimatiske forhold. Et komplet monitorings- og varslingsystem vil være baseret på flere af disse sensorer afhængigt af lokale forhold.

GNSS (Global Navigation Satellite System, også kaldet GPS) kan give meget præcis information om bevægelse i punkter af det ustabile fjeldparti. Ved processering af GNSS-data beregnes typisk 2–6 positioner i døgnet, hvorved der fås detaljerede tidserier af 3D-bevægelsesdata, som kan sammenholdes med f.eks. klimatiske data. Ved installationen skal der placeres en GNSS-station i et stabilt punkt og et antal GNSS-stationer i det ustabile område. Ved at sammenligne bevægelsen af de ustabile punkter med det stabile punkt kan der beregnes millimeterskala bevægelse af de ustabile punkter. Installationer af GNSS-stationer er gennemtestet og fungerer godt i alle miljøer, også i fjerntliggende egne med udfordrende klimatiske forhold.

Ekstensometre bruges til at få meget præcise målinger af udvidelsen på tværs af sprækker og installeres typisk langs bagvæggen af et ustabil fjeldparti. Der findes forskellige typer

ekstensometre, afhængigt af hvor lang afstand der skal måles over. Over kort afstand på op til tre meter bruges et fintfølede ekstensometer udformet som en stang. Over længere afstand på op til 15 meter bruges et ekstensometer som måler afstand ved hjælp af en line. Dertil kommer en type hydraulisk ekstensometer, som kan måle vertikale ændringer i højde.

Laser kan bruges til at måle ændring i afstand til reflektorer i det ustabile fjeldparti. Den placeres typisk, så der måles på tværs af store sprækker, hvor der er for lang afstand til at man kan installere ekstensometre. Laseren kan stå ude hele året, men om vinteren må laseren og reflektorplader være opvarmet for at undgå nedisning.

Feltradar (også kaldet Ground Based InSAR eller GB-InSAR) kan potentielt måle millimeterskala ændringer i afstand til store dele af det ustabile fjeldparti. Feltradaren kan f.eks. indstilles til at foretage en måling 1–2 gange om dagen afhængigt af behov og mulighed for datatransmission. Der fås målinger både i lys og mørke og i al slags vejr. Afstanden måles til naturlige reflektorer på overfladen i retning fra det ustabile fjeldparti til radaren. Det betyder, at radaren helst skal placeres direkte foran det ustabile fjeldparti, men da radaren ikke kan måle over længere afstand end maksimalt 3 km, vil det ofte ikke være muligt at placere radaren foran højrisiko fjeldpartierne i Grønland, da disse alle ligger i bredere fjorde. I nogle tilfælde vil feltradaren kunne placeres på et plateau over det ustabile fjeldparti, men dette vil give en begrænset dækning af fjeldpartiet. Feltradaren skal skærmes mod vejret og placeres i en bygning med vindue eller i en specialdesignet dome.

Hjørnereflektorer (Satellite Based InSAR eller SB-InSAR) bruges til at måle millimeterskala ændringer i afstand til punkter i det ustabile fjeldparti. En hjørnereflektor er en simpel metalkonstruktion designet til at reflektere radarsignalet fra InSAR-satellitter, f.eks. fra Sentinel-1 satellitterne, som giver nye data ca. hver 6. dag året rundt over en stor del af Grønland. Der fås målinger både i lys og mørke og i al slags vejr, men der kan kun måles bevægelse i satellittens synsretning. Af den grund kan bevægelse væk fra eller mod satellitten måles meget præcist, mens bevægelse på tværs af satellittens synsretning slet ikke kan måles. InSAR-data optages med to forskellige synsretninger, som til sammen giver rimelig opløsning i øst-vest og vertikal retning, men dårligere opløsning i nord-syd retning. I områder med snedække om vinteren monteres reflektoren på en mast som sikrer, at den ikke dækkes af sne, hvorved der fås data hele året.

Totalstation bruges til at måle ændringer i afstand og vinkler (horisontal og vertikal) til prismer installeret i det ustabile fjeldparti. På den måde kan der måles millimeterskala 3D-bevægelsesdata for prismerne over en afstand på op til 4 km, men de installeres ofte med kortere afstand for at mindske atmosfærisk støj på målingerne. Totalstationer skal skærmes mod vejret og placeres derfor oftest i en bygning med vindue, når de bruges til monitoring af ustabile fjeld.

Tiltmetre kan måle rotation med meget høj præcision. I ustabile fjeldpartier vil der ofte ske rotation af dele af fjeldpartiet, når det glider på et kurvet glideplan, eller når store blokke vælter ud af fjeldsiden. Med de meget præcise tiltmetre kan man detektere sådan rotation, selv når bevægelsen er meget lille. Tiltmetre er robuste instrumenter, som fungerer godt i fjerntliggende egne med udfordrende klimatiske forhold.

Kameraer bruges til at registrere større ændringer som stenskred i overfladen, eller centimeterskala gradvise bevægelser ved hjælp af deformationsanalyse. Kameraet kan indstilles til at tage et billede med nogle minutter, timer eller dages mellemrum afhængigt af behov og mulighed for datatransmission. Kameraer kan enten placeres i en vis afstand fra

det ustabile fjeldparti for at få et overblik eller tæt ved områder med meget bevægelse, f.eks. nær bagvæggen (den skredkant der afgrænser det ustabile fjeldparti bagtil). Kameraer kan desuden bruges til at undersøge vejrforhold før flyvning ud i felten. Kameraerne er bygget til at kunne stå ude hele året, men brugbare billeder fås kun, når lysforholdene og vejrliget er til det. Det betyder, at kameraer i Grønland vil give begrænset eller ingen dækning i vinterhalvåret.

Geofoner kan bruges til at registrere seismiske rystelser i undergrunden. Bevægelser i et ustabil fjeldparti vil skabe små jordrystelser, som kan detekteres og lokaliseres med et netværk af fintfølende seismiske instrumenter, installeret i eller nær det ustabile område. I forbindelse med monitoring af ustabile fjeldpartier kan information om jordrystelser supplere bevægelsesdata fra sensorer på overfladen.

Infralydsensorer er mikrofoner som er designet til at registrere meget små lydbølger (dvs. trykbølger) i luften. Metoden bruges primært til at monitorere vulkansk aktivitet og laviner, men kan også bruges til at monitorere stenskredsaktivitet i et ustabil fjeldparti. Infralydsensorer installeres ligesom geofoner i et netværk for at kunne bestemme retningen hvorfra lydbølgerne kommer. Mikrofonerne bør holdes fri for sne om vinteren.

Borehuller med f.eks. tryksensorer, temperatursensorer og tiltmetre kan bruges til at monitorere grundvandstrømning og bevægelser i dybden, hvilket kan give information om bl.a. grundvandsstand og dybden til glideplanet. Målinger af fluktuationer i grundvandsstanden vil kunne korreleres med de målte bevægelser og være vigtigt input til at forstå hvad det er der driver bevægelserne. Nøjagtig information om dybden til glideplanet vil være med til at give et præcist estimat af volumen af det ustabile fjeldparti.

Vejrstationer bruges til at registrere ændringer i nedbør, snedybde, vind og temperatur, hvilket kan være et vigtigt element af et varslingsystem, da mange ustabile fjeldpartier reagerer på øget grundvandsstand i forbindelse med nedbør eller snesmeltning.

Afslutningsvis bemærkes at optiske og InSAR-satellitdata giver mulighed for at få data fra et ustabil fjeldparti uden installationer på jorden, men at disse har meget begrænset værdi i varslingsammenhæng pga. den begrænsede tidslige og rumlige opløsning.

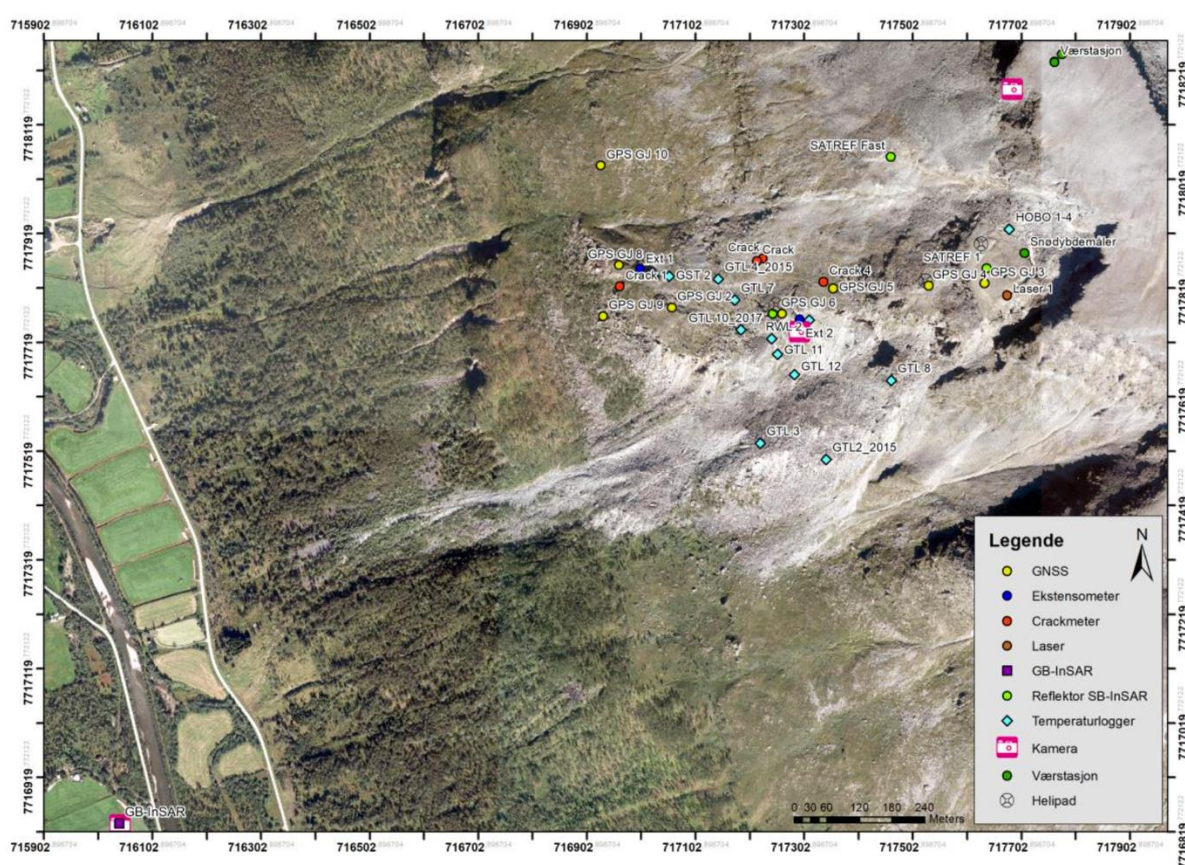
Tabel 2: Sensorer til monitoring af ustabile fjeldpartier

Sensortype	Tidslig opløsning	Præcision	Ulemper /begrænsninger	Strømforbrug *	Datatransmission	Pris inkl. strømkilde**
GNSS	Typisk 2–6 gange per dag	mm		4,5 W	0,5 MB per datafil	200 000 kr. per styk. Mindst to stationer.
Ekstensometer	Kontinuerlig	sub-mm	Måler bare ændring i afstand på tværs af en enkelt sprække	Ca. 1 W	< 1 MB per dag	Ca. 30 000 kr. per styk.
Laser	Kontinuerlig	mm	Måler bare ændring i afstand (som ekstensometer)	1–3 W	< 1 MB per dag	50 000–100 000 kr. Der kan installeres et antal prismer til samme laser.
Feltradar	Typisk 1–2 gange per dag	mm	Skal placeres nedenfor eller ovenfor område i bevægelse, hvilket ofte ikke er muligt i ustabile fjeldpartier over fjorde. Radaren skal stå i bygning eller dome.	65 W ved optagelse, meget mindre ved standby	Ca. 10 MB per datafil	2 200 000 kr.
Hjørnereflektor	Ca. en gang per 6. dag, afhængigt af satellitdækning	mm	Ikke mulighed for daglige målinger	Intet	Ingen (download af satellitdata)	50 000 kr. per styk. Der installeres typisk mindst tre reflektorer
Totalstation	Flere gange per dag	mm	Skal stå i bygning.	10 W	< 1 MB per dag	100 000 kr.
Tiltmeter	Kontinuerlig	sub-grader (rotation)		0,5 W	< 1 MB per dag	30 000 kr.
Kamera	Typisk 1–2 gange per dag	cm	Virker kun i dagslys. Kan kun registrere store ændringer i overfladen eller cm-skala bevægelser.	Ca. 15 W ved optagelse, meget mindre ved standby	20–100 MB per billede	50.000–200 000 kr.
Geofoner	Kontinuerlig			1–3 W	Ca. 250 MB per dag	50 000 kr.
Infralydsensorer	Kontinuerlig		Skal helst holdes fri for sne om vinteren	0,2 W	Ca. 30 MB per dag	50 000 kr.
Borehul	Kontinuerlig			Ca. 5 W		1 500 000 kr.
Vejrstation	Typisk hvert 10 minut			0,5 W	< 10 kB per dag	100 000 kr.
* Strømforbrug til at drive instrumenterne, ikke til transmission af data. ** I prisestimerne er medregnet omtrentlig udgift til installation, men ikke til mobilisering til lokalitet.						

5.2 Erfaringer fra udlandet (Norge og Schweiz)

I Norge ligger ansvaret for fjeldskred hos staten, og arbejdet udføres af Norges Geologiske Undersøgelse (NGU) og Norges Vassdrags- og Energidirektorat (NVE). NGU står for den regionale kortlægning af ustabile fjeldpartier samt detaljeret kortlægning og risikoklassificering af identificerede ustabile fjeldpartier. NVE har ansvaret for den kontinuerlige monitoring af identificerede højrisko fjeldpartier samt for at varsle beredskabsaktørerne blandt politi og kommuner.

Der er kortlagt mere end 300 ustabile fjeldpartier i Norge, heraf indtil videre syv som er klassificerede som høj risiko, og som har et varslingsystem baseret på kontinuerlig monitoring af fjeldsiden. Derudover er der ca. 20 ustabile fjeldpartier med moderat eller lav risiko som monitoreres periodisk. Et eksempel på et monitoringsystem for et af højrisko fjeldpartierne er vist i figur 5.



Figur 5: Eksempel på system til kontinuerlig monitoring af det ustabile fjeldparti Gamanjuni i det nordlige Norge. Monitoringsystemet består af otte GNSS-stationer, seks ekstensometre, en laser, en feltradar (GB-InSAR), tre hjørnereflektorer (SB-InSAR), to kameraer og tre forskellige typer vejrstationer. Der er ligeledes etableret tre helipads i forskellige højder for at sikre adgang til instrumenterne. Kilde: A.-M. Hansen, Universitetet i Tromsø, 2020.

Forud for etableringen af kontinuerlig monitoring af et højrisko fjeldparti foretages grundige forundersøgelser ved hjælp af geologisk og evt. geofysisk kortlægning samt stabilitetsanalyse for at definere mulige scenarier og deres risici. Der er skrevet adskillige ph.d.-projekter og specialer om de ustabile fjeldpartier i Norge, i tillæg til rapporter og videnskabelige publikationer udgivet af NGU og NVE. I risikovurderingen indgår udover

detailstudier af det enkelte fjeldparti også skredhistorikken baseret på den regionale kortlægning og dateringer af tidligere fjeldskred i området.

Moniteringssystemerne for de syv højrisiko fjeldpartier varierer fra sted til sted. Nogle har et omfattende system med sensorer både på overfladen og i borehuller, mens andre bare har et moniteringssystem af forskellige bevægelsessensorer på overfladen. På alle syv fjeldpartier er der installeret kameraer og ekstensometre. Fem af syv fjeldpartier har et netværk af GNSS-stationer. Derudover er tiltmetre og feltradar mest anvendt. Seks af syv fjeldpartier har en klimastation, som måler nedbør og snedybde. På flere af de ustabile fjeldpartier er der etableret helipads for at lette adgangen for det tekniske personale som vedligeholder instrumenterne.

I Schweiz ligger ansvaret for monitering og varsling af fjeldskred hos de enkelte delstater eller kommuner. Der er flere steder etableret varslingssystemer for fjeldskred. Til instrumenteringen af ustabile fjeldpartier benyttes typisk netværk af GNSS-stationer og automatiske totalstationer, samt feltradar og seismiske instrumenter. Grundige forundersøgelser udføres i Schweiz på baggrund af kortlægning og logging i borehuller samt i nogle tilfælde tunneller.

5.3 Potentiale og udfordringer for anvendelse i Grønland

Den afgørende fordel ved et varslingssystem baseret på monitering af et ustabil fjeldparti er, at der fås bedre tid til at evakuering, sammenlignet med tsunamivarslingen som først udløser varsel, når der er dannet en tsunami. Ved at monitere fjeldpartiets bevægelser og varsle ved observeret acceleration kan evakueringer foretages dage eller uger før et eventuelt fjeldskred.

En væsentlig ulempe er til gengæld, at det sandsynligvis ikke kan undgås, at der foretages unødvendige evakueringer, fordi det ikke kan vides med sikkerhed om en observeret acceleration i bevægelserne fører til fjeldskred. Selv med et godt kendskab til et ustabil fjeldpartis bevægelsesmønster kan man ikke på forhånd vide, hvor meget bevægelserne vil øges, før der sker et fjeldskred. Et eksempel herpå var forløbet op til fjeldskredet ved Mannen i Norge i 2019. Fjeldpartiet havde været kontinuerlig monitoreret siden 2009, og fra 2014 observeredes en gradvis acceleration af bevægelserne, hvilket førte til 16 evakueringer af flere dages varighed, før fjeldskredet skete i 2019. Sammenlagt var indbyggerne under fjeldpartiet evakueret i mere end to måneder. Dette eksempel viser, at selv med en betydelig mængde data, et grundigt kendskab til fjeldpartiets bevægelsesmønster og verdensklasse ekspertise inden for fjeldskredsmonitering, kan unødvendige evakueringer ikke undgås.

En anden ulempe er, at det vil tage lang tid at etablere et varslingssystem baseret på monitering af fjeldpartiet. Det er nødvendigt med grundige undersøgelser over længere tid for at kortlægge og risikoklassificere forskellige scenarier, og for at oparbejde et så godt kendskab til fjeldpartiets typiske variationer, at man kan have et velfungerende og rimeligt sikkert varslingssystem. Til eksempel var bevægelsen af det ustabile fjeldparti Karrat 3 i Uummannaqs fjordsystem stærkt øget i 2018, med hastigheder som var omtrent dobbelt så hurtige som året før. Der blev i samme periode registreret en betydelig øgning af jordrystelser på de seismiske stationer og småskred i optiske satellitdata i området. Fra 2019 var bevægelsen igen tilbage på samme niveau som i 2017. Dette eksempel viser, at der kan

være markant acceleration i bevægelserne, uden at det fører til fjeldskred, og at det vil kræve flere år at lære fjeldpartiets bevægelser og typiske variationer at kende.

Afslutningsvis skal det nævnes, at der vil være et sikkerhedsmæssigt aspekt i at have folk til at arbejde med installation og vedligehold i et ustabil fjeldparti. Der vil desuden være endnu vanskeligere forhold for vedligehold af instrumenterne om vinteren.

5.4 Tekniske løsninger og pris for etablering og drift

Et varslingsystem for et potentielt fjeldskred vil kræve omfattende investeringer til både etablering og drift. Det estimeres, at det vil koste mindst 20 mio. kr. at etablere et monitoringsystem til kontinuerlig monitoring af et enkelt ustabil fjeldparti. Det præcise beløb afhænger af, hvor omfattende et monitoringsystem der er nødvendigt for at få en faglig forsvarlig løsning. Det estimeres yderligere, at den løbende drift vil koste 15–20 mio. kr. årligt. De løbende udgifter vil primært gå til etablering af en vagtordning samt logistik i forbindelse med vedligehold af instrumenter. En 24/7-vagtordning kræver normalt seks fuldtidsansatte medarbejdere, hvis det skal fungere på sigt med normale arbejdstider, fridage og andet fravær.

Til sammenligning har NVE i Norge pt. lønudgifter til 6 geologer med egen 24/7 vagtordning og 10 ansatte med teknisk kompetence med egen 24/7 teknisk vagtordning og en administrativ ansat. Dertil kommer driftsudgifter til vedligehold af instrumenter, logistik, IT-systemer m.v. på 15 mio. norske kr. per år og løbende investeringer på 12–15 mio. norske kr. per år (L. H. Blikra, pers. kommunikation). Hertil kommer udgifter til beredskabet, som vil øges med øget monitorering og fareniveau. Til eksempel kostede beredskabet og monitoreringen alene af fjeldpartiet Mannen i Norge 5–6 mio. norske kr. i det sidste år før fjeldskredet skete i 2019. NVE har i dag ansvaret for varslingsystemer på syv ustabile fjeldpartier, så prisen for f.eks. et enkelt varslingsystem i Grønland vil være lavere, men det vil være mere end en syvendedel af udgiften, fordi logistikken generelt er mere udfordrende i Grønland, og fordi der er brug for bemanning til vagtordning, uanset hvor mange ustabile fjeldpartier der monitoreres. I tillæg til ovenstående har NGU løbende lønudgifter til 4–5 geologer samt driftsudgifter på 3–4 mio. norske kr. per år til feltarbejde m.v. i forbindelse med kortlægning og risikoklassificering af ustabile fjeldpartier i Norge.

6. Muligheder for evakuering og selvevakuering

Tsunamivarsling vil formentligt kunne give rimeligt sikre varslinger, men vil ikke give lang tid til evakuering. Evakuering kan ske til højtliggende områder i umiddelbar nærhed af de fleste eller alle berørte byer og bygder i Grønland. Evakueringen vil kunne gøres med en begrænset beredskabsindsats, forudsat at indbyggerne er forberedt og trænet i selvevakuering, og en falsk alarm vil kunne afblæses efter få timer.

Varsling af et potentielt fjeldskred vil give bedre tid til evakuering, men er en usikker metode som uundgåeligt vil medføre unødvendige evakueringer af dage eller ugers eller eventuelt måneders varighed. Langvarige evakueringer vil kræve betydelig beredskabsindsats samt forberedelse af faciliteter til at huse indbyggerne.

7. Afsluttende kommentarer og konklusioner

Der findes ikke noget varslingsystem, 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' vurdering er derfor, at det er usikkert, om det vil lykkes at etablere et velfungerende varslingsystem

Internationalt sker tsunamivarsling i dag ved hjælp af metoder, som alle ville involvere betydelig udvikling for at komme til at fungere i Grønland. Varsling af et potentielt fjeldskred vil kræve en omfattende organisation og vil uundgåeligt medføre andre problemer i form af unødvendige evakueringer.

7.1 Tsunamivarsling

Hvis det besluttet at iværksætte etablering af tsunamivarsling i Grønland, bør der ideelt set bruges to eller flere uafhængige metoder til detektion af tsunamibølgen for at mindske risikoen for falske alarmer. Der er dog ikke nogen metode som umiddelbart ville kunne etableres i Grønland.

Tryksensorer er meget anvendt i tsunamivarslingssystemer, men der er udfordringer for metoden i Grønland pga. isbjerge og havis. Hvis det besluttet at gå videre med denne metode, skal det undersøges, om det vil være muligt at installere tryksensorer på en sådan måde, at instrumenterne ikke beskadiges af dybtgående isbjerge, og at data kan transmitteres op på land uden brug af bølger.

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 bygger, 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. For andre områder i Grønland kræves yderligere arbejde for at kunne detektere en tsunami.

GNSS-IR metoden til detektion af vandstandsændringer vil muligvis kunne bruges til varsling af tsunamier. Det er dog en meget umoden og uprøvet metode, hvorfor det er nødvendigt med forskning og udvikling for at afgøre, om den kan bruges til detektion af store vandstandsændringer pga. tsunamibølger. Det vil ligeledes tage en årrække, før der eventuelt vil kunne være et egentligt varslingsystem, og der er ikke nogen garanti for, at det kommer til at virke.

7.2 Varsling af potentielt fjeldskred

Udfordringen med den korte tid til varsling af tsunami kan undgås ved i stedet at etablere et varslingsystem for potentielt fjeldskred. GEUS' vurdering er dog, at det vil være vanskeligt at etablere et fagligt forsvarligt varslingsystem for fjeldskred, da det kræver et meget indgående kendskab til fjeldpartiets naturlige bevægelsesmønster at kunne definere tærskelværdier for varsling. Selv med et velfungerende varslingsystem kan det ikke undgås,

at der vil være falske alarmer. Falske alarmer kan medføre unødvendige evakueringer af dage eller ugers eller eventuelt måneders varighed, hvilket vil være en særlig udfordring i bygder med begrænset infrastruktur.

Det kan overvejes at iværksætte periodisk monitoring af et eller flere ustabile fjeldpartier, som vurderes at udgøre en høj risiko for dannelse af tsunamier. Det kan være systemer med forskellige bevægelsessensorer (f.eks. GNSS-stationer og hjørnereflektorer) og vejrstation, som evalueres et antal gange årligt. Periodisk monitoring kan ikke danne grundlag for et varslingsystem, men kan sammen med detaljeret kortlægning og analyser give en bedre forståelse af mulige scenarier og deres sandsynlighed, og understøtte de løbende beslutninger af beredskabet.