

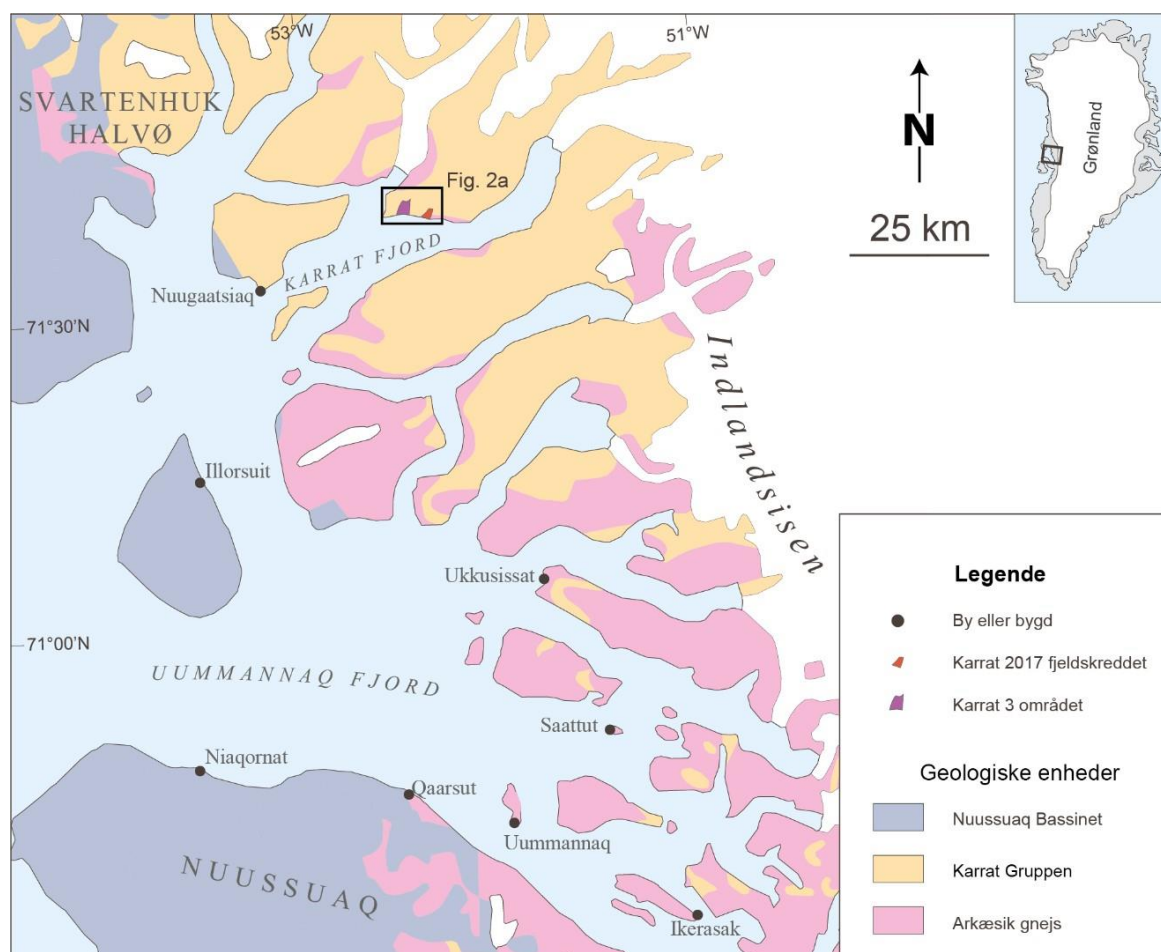
# GEUS Notat om risiko for fjeldskred og tsunamibølger i Uummannaqs fjordsystem – status for faglig viden marts 2021

## Indholdsfortegnelse

<b>Indledning</b> .....	<b>2</b>
<b>Sammendrag</b> .....	<b>4</b>
<b>Ustabile områder i Karrat Fjorden</b> .....	<b>5</b>
Karrat 1 .....	6
Karrat 2 .....	6
Karrat 3 .....	7
Samlet vurdering af Karrat 1, 2 og 3 .....	8
<b>Tsunamimodellering</b> .....	<b>9</b>
Metode og datagrundlag .....	9
Tsunamimodellering for 2017-fjeldskredet .....	9
<b>Tsunamimodellering for Karrat 1, 2 og 3</b> .....	<b>10</b>
Nuugaatsiaq .....	12
Illorsuit .....	13
Qaarsut.....	14
Niaqornat .....	15
Uummannaq .....	16
Saattut.....	18
Ukkusissat .....	19
Ikerasak .....	20
Sammenligning med tsunamimodellering af prof. Patrick J. Lynett .....	21
<b>Afsluttende kommentarer og konklusioner</b> .....	<b>22</b>
<b>Referencer</b> .....	<b>23</b>

## Indledning

Karrat Fjorden i det centrale Vestgrønland er en del af Uummannaqs fjordsystem (figur 1). Den 17. juni 2017 udløste et fjeldskred på den sydvendte kyst af Karrat Fjorden en tsunami, der ramte de to nærliggende bygder Nuugaatsiaq og Illorsuit. I august 2017 blev der igangsat en screeningundersøgelse af risiko for større fjeldskred i hele Grønland. I forbindelse med denne undersøgelse blev tre lokaliteter i Karrat Fjorden identificeret. De tre lokaliteter, Karrat 1, 2 og 3 (figur 2a), blev alle placeret i kategorien "meget høj risiko for alvorlige fjeldskred" i forbindelse med afrapporteringen.



Figur 1: Oversigtskort over Uummannaqs fjordsystem med 2017-skredet, Karrat 3 og udsnittet i figur 2a markeret.

De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS) udarbejdede først i juni 2018, og senest i oktober 2020, nye notater med en vurdering af risiko for fjeldskred og tsunamibølger i Karrat Fjorden. Her bekræftedes den store geologiske ustabilitet af fjeldsiderne i Karrat Fjorden. Det var GEUS' vurdering, at området stadig havde en meget høj risiko for alvorlige fjeldskred, og dermed uændret i forhold til juni 2017, hvor den beredskabsfaglige vurdering var, "at Nuugaatsiaq og Illorsuit under de nuværende betingelser fortsat bør betragtes som fareområde". Nærværende notat er en opdatering af den viden, der blev præsenteret i det seneste notat fra efteråret 2020, og medtager de nye resultater af tsunamimodellinger udført af Norges Geotekniske Institut (NGI).

NGI har udført tsunamimodelleringen på bestilling fra GEUS, efter det i november 2020 blev besluttet at fremskynde tsunamimodelleringen for Uummannaqs fjordsystem på opfordring fra Departementet for Forskning og Miljø. Dermed blev der foretaget en omprioritering i projektet Undersøgelse af risiko for alvorlige fjeldskred i Grønland, så en tsunamimodellering for området kunne foreligge i slutningen af marts 2021 i stedet for Q3 2022. Modelleringen skulle beregne de forventede opskylshøjder i Nuugaatsiaq og Illorsuit fra en tsunami forårsaget af et fjeldskred fra det ustabile område Karrat 3 med et anslået volumen på  $\sim 400 \times 10^6 \text{ m}^3$  (ca. 10 gange større end fjeldskreddet i 2017).

Efterfølgende blev modelleringen udvidet til at omfatte alle byer og bygder i Uummannaqs fjordsystem; Nuugaatsiaq, Illorsuit, Niaqornat, Qaarsut, Ukkusissat, Uummannaq, Saattut og Ikerasak, samt tsunamimodellering af fjeldskred fra alle tre ustabile lokaliteter Karrat 1, 2 og 3 og herunder to scenarier for Karrat 3 (Blok B og Blok A+B).

## Sammendrag

Tsunamimodelleringerne fra NGI viser, at et fjeldskred fra Karrat 3 vil medføre meget store opskylshøjder i Uummannaqs fjordsystem (tabel 1). Den nærmeste bygd, Nuugaatsiaq, vil blive ramt af første bølge efter syv minutter og den fjerneste efter 38 minutter.

Modelleringerne viser ekstreme opskylshøjder for flere af byerne og bygderne. Nuugaatsiaq, Illorsuit og Niaqornat oversvømmes fuldstændigt, imens Qaarsut og Uummannaq vil opleve meget høje opskylshøjder. Oversvømmelserne er mere lokale i Saattut, Ukkusissat og Ikerasak længere væk fra Karrat 3. Hertil genereres der så store bølger i fjordsystemet, at det kan være til fare for både på det åbne vand selv langt fra fjeldskredet. Fjeldskred fra Karrat 1 og 2 vil kun udgøre en risiko for Nuugaatsiaq og Illorsuit, men kan medføre stærk strøm ved andre byer og bygder.

*Tabel 1: Simulerede ankomsttider og opskylshøjder for tsunamier udløst af Karrat 1 og 2 samt de to scenarier for Karrat 3. Opskylshøjderne i tabellen er højeste estimater ved højvande på 2 m over middelvandstand. Opskylshøjderne er angivet i intervaller, som afspejler, at tsunamibølgerne når forskellige højder afhængigt af den lokale topografi og batymetri.*

	Tid til ankomst af første bølge	Opskylshøjde Karrat 1 (13 x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Opskylshøjde Karrat 2 (11 x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Opskylshøjde Karrat 3 Blok B (412 x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Opskylshøjde Karrat 3 Blok A+B (524 x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
Nuugaatsiaq	7 min	6 m	6 m	32 – 72 m	37 – 74 m
Illorsuit	13 min	3,7 m	3,9 m	19 – 35 m	20 – 43 m
Qaarsut	26 min	-	-	9 – 20 m	11 – 23 m
Niaqornat	23 min	-	-	9 – 14 m	11 – 17 m
Uummannaq	30 min	-	-	6 – 13 m	6 – 14 m
Saattut	35 min	-	-	4 – 10,5 m	5 – 10,5 m
Ukkusissat	26 min	-	-	5 – 6,5 m	5,5 – 7,5 m
Ikerasak	38 min	-	-	4 – 10 m	4,5 – 11 m

GEUS ser fortsat stor aktivitet i de aktive områder i Karrat Fjorden ved analyser af satellitbilleder (Sentinel-2 optiske og Sentinel-1 InSAR) for 2019–2021. Feltarbejdet i sommeren 2019 viste ligeledes, at der er strukturelt betinget potentiale for fjeldskred langs hele den sydvendte kystskråning omkring de aktive områder i Karrat Fjorden.

På baggrund af bevægelseshistorikken og de aktuelle bevægelser i de ustabile områder vurderer GEUS, at der er større sandsynlighed for fjeldskred fra Karrat 1 og 2 end fra Karrat 3. Til gengæld er konsekvensen af et fjeldskred fra Karrat 3 meget større end for Karrat 1 og 2, da en tsunami fra Karrat 3 kan ramme alle byer og bygder i Uummannaqs fjordsystem.

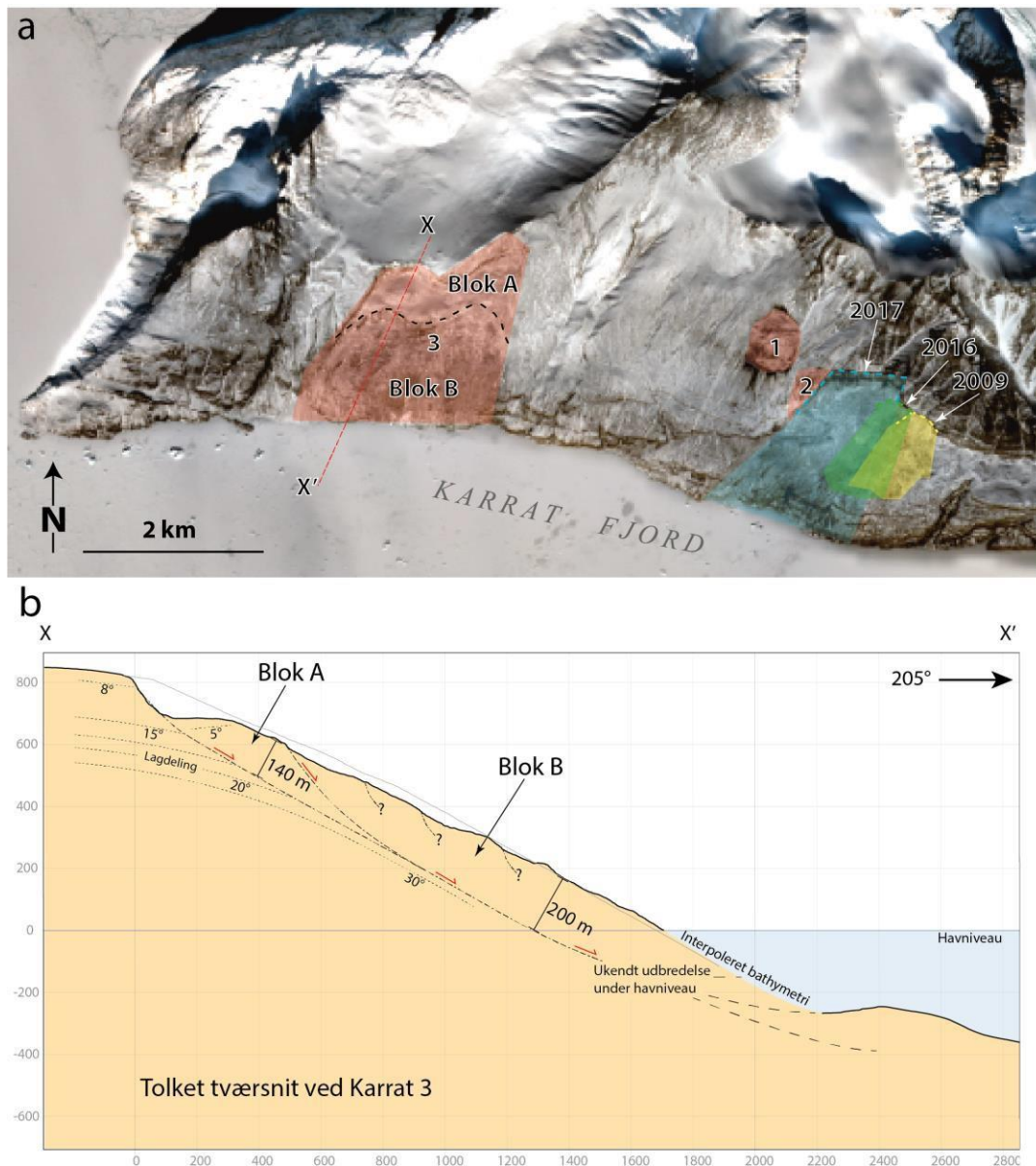
GEUS vurderer derfor, at de kritiske områder Karrat 1, 2 og 3 udgør en uændret meget høj risiko for alvorlige fjeldskred og dermed ligeledes en uændret meget høj risiko for tsunamier.

Det er ikke muligt at forudsige hvornår eller præcist hvor, de næste større fjeldskred vil forekomme i Karrat Fjord-området. Da der er flere kritiske områder med meget høj risiko, må

det ligeledes fortsat forventes, at der også efter næste større fjeldskred stadig vil være meget høj risiko for nye alvorlige fjeldskred.

## Ustabile områder i Karrat Fjorden

Nedenstående opdaterede vurdering af de tre ustabile områder er baseret på analyse af satellitbilleder (Sentinel-2 optiske og Sentinel-1 InSAR) til og med marts 2021 samt analyser af højdemodeller (ArcticDEM), feltobservationer og tolkninger af skråfoto fra feltarbejdet i 2019. Vurderinger og estimater af volumener er brugt i tsunamimodelleringen.



Figur 2a: Sentinel-2 satellitbillede med de tre skred fra 2009, 2016 og 2017 vist, samt de ustabile skråninger Karrat 1, 2 og 3. Afgrænsningen mellem Blok A og Blok B i Karrat 3 er vist med stiplede sort linje. Positionen af profilet i figur 2b er vist med en rød streg og X-X'. Figur 2b: Tolket tværsnit igennem Karrat 3, der viser det konstruerede forløb af brudfladen og opdelingen i to blokke. De røde pile viser bevægelsesretningen. Udbredelsen under havniveau er ukendt, men det ses fra tolkningen, at denne kan fortsætte flere hundrede meter til havs.

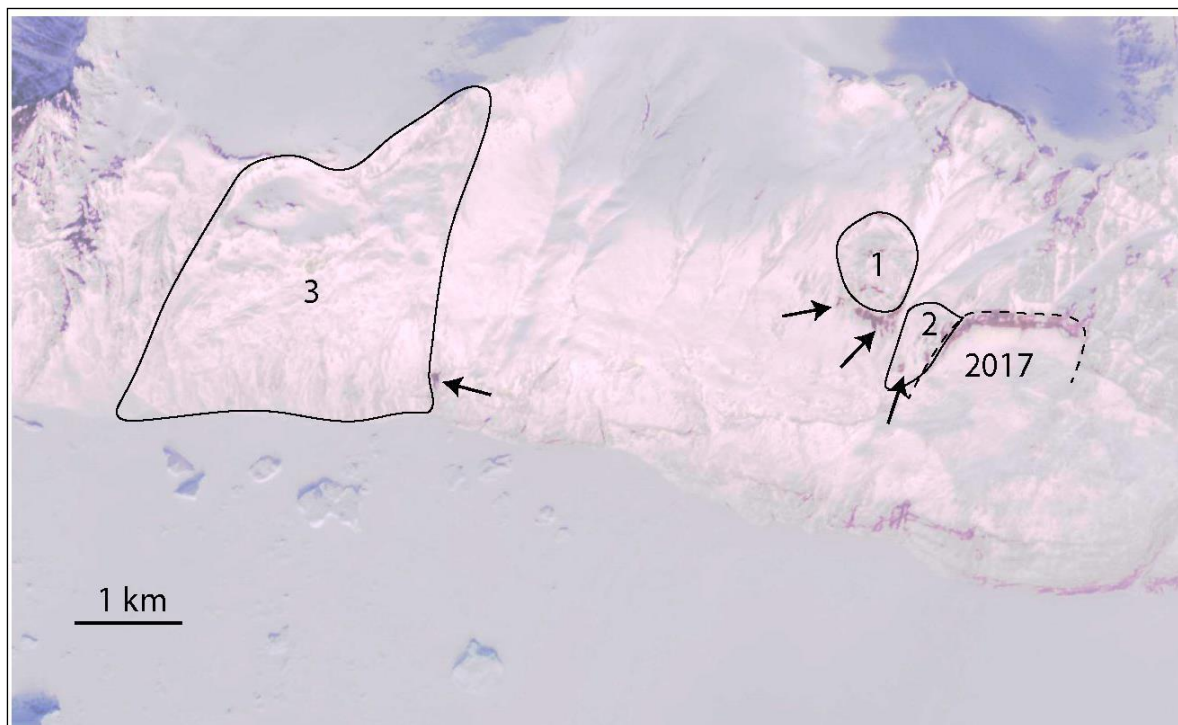


## Karrat 1

Dette område, som ligger ca. 1 km vest for skredområdet fra 17. juni 2017, viser fortsat høj aktivitet. Området har været i bevægelse siden maj 2015 og har siden september 2015 dekorreleret i InSAR, hvilket indikerer bevægelser på mere end 1 cm om ugen. Optiske billeder viser, at der er jævnlig stenfallsaktivitet i den nedre del af området (figur 3). Området er meget opbrudt, og det må antages, at bevægelserne igennem de seneste år har mindsket dets indre sammenhængskraft samt sænket friktionen på brudfladen, den glider på. Derfor vurderer GEUS fortsat, at der er meget høj risiko for et alvorligt fjeldskred fra området. Et estimat ud fra dimensionerne af området i bevægelse og højden af bagvæggen viser et totalt volumen på mindst  $13 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

## Karrat 2

Dette område ligger mellem Karrat 1 og skredområdet fra 2017. Det ser ud til at være afgrænset af den samme brudflade, som 2017-skreddet gled på. Området har vist tegn på bevægelse siden 2015 og har siden juni 2017 dekorreleret i InSAR, hvilket indikerer bevægelser på mere end 1 cm om ugen. De optiske billeder viser jævnlig stenfallsaktivitet fra den østlige afgrænsning af området, ind mod skredarret fra 2017-skreddet (figur 3). Da området sandsynligvis glider på de samme strukturer som 2017-skreddet og er i hurtig bevægelse, er GEUS' vurdering uændret, at der er meget høj risiko for et alvorligt fjeldskred fra området. Området måler ca.  $800 \times 500 \text{ m}$ , og antager man, at bevægelserne sker over den samme skredflade som 2017-skreddet, fås et volumen på  $11 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

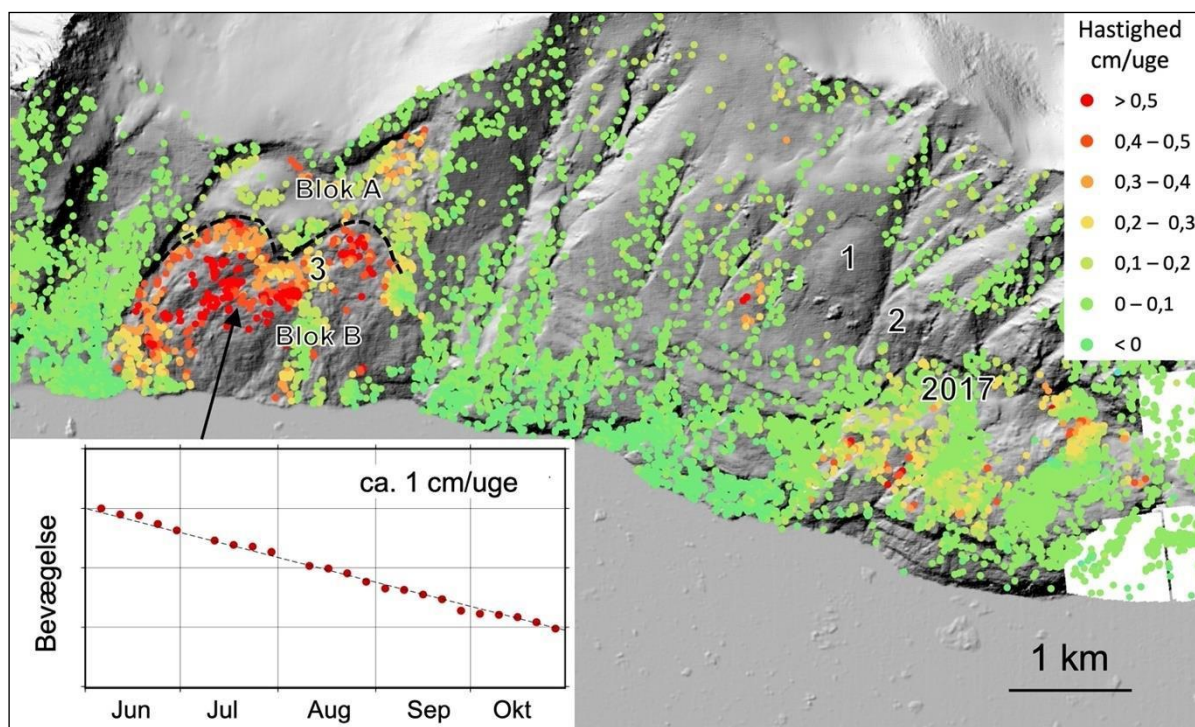


Figur 3: Sentinel-2 satellitbillede fra 15/03 2021, der viser nylig aktivitet (stenfald) ved pilene langs bagvæggen af 2017-skreddet samt i tåen af Karrat 1 og 2 samt i den østlige del af Karrat 3. Stenfald ses som sorte striber og plamager på den ellers sneklædte skråning. Farverne i billedet er forstærket for at gøre det nemmere at se stenfaldet.

### Karrat 3

Mod vest, ca. 3 km fra Karrat 1 og 2, ligger Karrat 3, som viser tegn på mangeårig bevægelsesaktivitet. Området er meget stort, ca. 2000 x 1600 meter med en ukendt fortsættelse under havniveau, og det har en veludviklet bagvæg på op til 120 meter og veludviklede frigørelsesflader til begge sider. Hele det ustabile område er meget opbrudt med adskillige sprækker og buler og en generel ujævn overflade, hvilket indikerer en lang bevægelsehistorik.

InSAR-data såvel som optiske billeder viser, at området kan opdeles i to blokke med forskellige bevægelsesmønstre (figur 2a). Den øverste blok (Blok A), som strækker sig fra bagvæggen og ned til 600-700 meter over havniveau, havde i 2017–2020 en bevægelse på 0,15–0,3 cm om ugen i retning mod kysten (figur 4). Fra 600-700 meter over havniveau og ned er der en anden blok (Blok B), som har en hurtigere og mere heterogen bevægelse. I den nedre del af Blok B er der områder, som dekorrelerer i InSAR, hvilket viser, at bevægelsen sandsynligvis er større end ca. 1 cm om ugen. På baggrund af strukturelle analyser vurderes det, at disse bevægelser er relativt overfladiske.



Figur 4: InSAR-data fra 2018, der viser bevægelse af det ustabile område Karrat 3 samt mindre bevægelse nedenfor bagvæggen af 2017-skreddet. Den stiplede linje viser grænsen mellem Blok A og Blok B i Karrat 3. Der er ingen datapunkter i områderne Karrat 1 og 2 samt i nogle områder i den nedre del af Karrat 3, fordi bevægelserne her er så hurtige, at InSAR-dataene dekorrelerer. Den indsatte figur viser tidsserien for et punkt i den centrale del af Blok B i Karrat 3. I processeringen er kun medtaget billeder fra juni til oktober for at undgå problemer pga. snedække.

Analyse af InSAR-data i perioden 2017–2020 viser, at der kan være store variationer i bevægelsehastigheden i det ustabile område. Fra 2017 til 2018 blev der således registreret en markant øgning i bevægelsen, til ca. dobbelt så høje hastigheder over hele området, men i 2019 og 2020 blev der igen registreret hastigheder svarende til niveauet i 2017. Den øgede

aktivitet i 2018 må antages at afspejle naturlige variationer i bevægelserne i det ustabile område.

Karrat 3 ustabiliteten ses tydeligt i flyfoto fra 1953, hvilket var baggrunden for, at GEUS i notatet af 9. oktober 2020 vurderede, *at området har været aktivt i meget lang tid, muligvis hundreder eller tusinder af år*. Bevægelsen har sandsynligvis ikke været konstant gennem områdets udvikling, men hvis man antager, at bevægelsen har været i samme størrelsesorden, som den er i dag, siden området begyndte at blive ustabil, ville det betyde, at området har været i bevægelse i 1500 år. Dette grove skøn støtter vurderingen om en meget lang bevægelsehistorik i området.

Baseret på dimensionerne af ustabiliteten og højden af bagvæggen (120 m) blev Karrat 3's volumen over havniveau i notatet af oktober 2020 beregnet til at være mindst  $380 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Dette estimat var i sig selv ti gange så stort som volumenet af 17. juni 2017-skreddet, men var som beskrevet et minimumsestimater, da det ikke tog højde for en evt. kurvet brudflade.

I forbindelse med nærværende tsunamimodellering er der lavet nye detaljerede profilanalyser af brudfladens udbredelse inde i fjeldet (figur 2b). Denne indikerer, at Blok A er op til 140 m tyk og Blok B op til 200 m tyk. Analysen viser endvidere, at hele den centrale del af skredlegemet bevæger sig parallelt med lagdelingen i fjeldet. Dette betyder, at det ustabile område primært glider på en plan brudflade, og at skreddet derfor skal klassificeres som et translationsskred med mindre elementer af rotationsbevægelse i toppen og måske i bunden. Translationsskred er som oftest mindre stabile end rotationsskred, som glider på kurvede brudflader. Analysen viser desuden, at skreddet kan fortsætte med op til flere 100 m under havniveau (figur 2b).

Blok A får med den kortlagte udbredelse og estimerede tykkelse et volumen på  $112 \times 10^6 \text{ m}^3$  og Blok B på  $412 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Dvs. at det samlede volumen under disse forudsætninger for Karrat 3 bliver  $524 \times 10^6 \text{ m}^3$  over havniveau.

Det er ikke muligt at forudsige, om ustabiliteten vil fortsætte sin krybende nedadgående bevægelse, eller om den vil udvikle sig til et fjeldskred. Hvis der sker et fjeldskred fra området, er det ligeledes heller ikke muligt at forudsige, om det vil involvere hele ustabiliteten (Blok A+B) eller dele af den (Blok B eller dele deraf). Det er dog sandsynligt, at mindre skred (f.eks. dele af Blok B) kan have destabiliserende effekt på resten af Karrat 3.

## Samlet vurdering af Karrat 1, 2 og 3

Bevægelsehistorikken for de tre ustabile områder har markante forskelle af betydning for vurderingen af potentielle fjeldskred fra områderne. Både Karrat 1 og 2 har haft en kortvarig udvikling siden 2015 med meget hurtige bevægelser, og fjeldskreddet i 2017 må antages at have haft en destabiliserende indvirkning på Karrat 2. Karrat 3 har haft en mangeårig udvikling og viser langsommere bevægelser. På denne baggrund vurderer GEUS, at der er større sandsynlighed for fjeldskred fra Karrat 1 og 2 end fra Karrat 3.

Analyserne i nærværende notat understreger, at de tidligere fjeldskredshændelser (senest i 2009, 2016 og 17 juni 2017) og de ustabile områder i Karrat Fjorden sandsynligvis er strukturelt betingede som følge af lagdelingens hældning på  $20^\circ - 30^\circ$  mod kysten. Fremtidige fjeldskred fra området kan være med til at destabilisere områder, som i dag ikke er i bevægelse. Det er endnu uvist, om ændringer i permafrosten pga. klimaforandringerne vil øge sandsynligheden for, at der sker fjeldskred i Karrat Fjord området.



## Tsunamimodellering

Baseret på de estimerede volumener af Karrat 1, 2 og 3 er der modelleret tsunamiudbredelse i Uummannaqs fjordsystem. Modelleringerne er udført af Norges Geotekniske Institut (NGI). NGI har leveret en detaljeret rapport (forfattet på engelsk), og hovedkonklusionerne er opsummeret her. Hovedformålet med nærværende tsunamimodellering har været:

- i) At tilvejebringe en simulering, der matcher de observerede tsunami-opskylshøjder genereret af 2017-hændelsen. Denne simulering vil give en ide om, hvor godt de algoritmer og inputparametre, der anvendes i modelleringen, passer til de faktiske forhold. Det er derfor et værdifuldt input til det andet mål.
- ii) At estimere de potentielle opskylshøjder af en tsunami, skabt af et potentielt fjeldskred i Karrat Fjorden, i de nærliggende byer og bygder (Nuugaatsiaq, Illorsuit, Niaqornat, Qaarsut, Ukkusissat, Uummannaq, Saattut og Ikerasak).

Med opskylshøjde forstås den maksimale højde over havniveau, som overskylles af tsunamien. Med tsunami menes hele serien af tsunamibølger.

### Metode og datagrundlag

Tsunamimodelleringen er udført i fire trin: 1) numerisk modellering af fjeldskreddets dynamik, 2) modellering af den tsunami som skabes når fjeldskredet rammer vandet, 3) numerisk modellering af tsunamien udbredelse i Uummannaqs fjordsystem og 4) modellering af opskylshøjde i nærliggende byer og bygder.

Datagrundlaget for tsunamimodelleringen udført af NGI har været: a) batymetriske data for Uummannaqs fjordsystem, b) detaljerede topografiske kort af de inkluderede byer og bygder, c) volumen og konfiguration af 2017-fjeldskredet og de ustabile områder Karrat 1, 2 og 3, og d) observationer fra 2017-hændelsen af opskylshøjder, tid mellem bølger og ankomsttid af første samt største bølge.

Modellernes inputparametre er desuden sammenholdt med data som GEUS har indsamlet for tidligere grønlandske fjeldskred vedr. forholdet mellem faldhøjde og udløbslængde. Faldhøjden og udløbslængden er henholdsvis den vertikale og den horisontale distance, som et fjeldskred bevæger sig. Forholdet mellem faldhøjde og udløbslængde er beskrevet ved hjælp af friktionsvinklen, som er en vigtig parameter i modelleringen af fjeldskreddets dynamik: jo lavere friktionsvinklen er, des højere hastighed får fjeldskredet og des større bliver tsunamien.

### Tsunamimodellering for 2017-fjeldskredet

Formålet med modellering af 2017-fjeldskredet er at sikre, at de algoritmer og inputparametre der anvendes i modelleringen, passer til de faktiske forhold og giver en realistisk simulering af tsunamier dannet ved de potentielle fjeldskred fra Karrat Fjord området.

Her er der anvendt de estimerede volumener på  $38,5 \times 10^6 \text{ m}^3$  (Svennevig et al., 2020) og  $48,5 \times 10^6 \text{ m}^3$  (Paris et al., 2019). De simulerede opskylshøjder og ankomsttider for første bølge er vist i tabel 2 for det lave volumen sammen med observationer af samme. Der er observationer af opskylshøjde i Nuugaatsiaq, Illorsuit og Qaarsut, mens der i Niaqornat og Uummannaq blev observeret "store dønninger".

For Nuugaatsiaq er de simulerede opskylshøjder størst øst for bygden. Inden for det bebyggede område er det simulerede opskyl ikke helt så højt som det observerede, men overordnet er der en rimelig overensstemmelse. For Illorsuit er der en god overensstemmelse, både hvad angår udbredelse og opskylshøjde. For Qaarsut er de simulerede opskylshøjder noget lavere end de observerede, men det fokuserede område for maksimalt opskyl i kystlinjens indhak ved molen og havnebygningen stemmer godt overens med observationerne. For Niaqornat og Uummannaq simuleres 1–1,5 m høje bølger langs kystlinjen med meget begrænset opskyl, hvilket stemmer godt overens med observationerne. For Saattut, Ukkusissat og Ikerasak, hvor vi ikke har konkrete observationer af opskyl, simuleres bølger på under 1 m.

Den simulerede og observerede ankomsttid for den første bølge i Nuugaatsiaq er 7–8 minutter efter fjeldskredet kl. 21:39 (tabel 2). For Illorsuit og Uummannaq er der observationer af ankomsttid for den største bølge, henholdsvis 25 og 53 minutter efter fjeldskredet. Modelleringerne kan ikke estimere den nøjagtige ankomsttid af den største bølge, men indikerer dog, at den største bølge ankommer til Illorsuit og Uummannaq henholdsvis 25 og 55 minutter efter fjeldskredet, i overensstemmelse med observationerne. Den simulerede tid mellem to bølgetoppe (bølgeperioden) er ca. 1 minut, hvilket ligeledes passer godt til observationerne som registreret i videoer fra Nuugaatsiaq.

Generelt set opnås der med simuleringen en god overensstemmelse med observationerne, hvilket indikerer, at modelleringen giver et retvisende billede af de faktiske forhold, og at den er egnet til at udføre simuleringer for andre potentielle fjeldskred.

Tabel 2: Simulerede og observerede opskylshøjder samt ankomsttider for 2017-fjeldskredet.

	Simuleret opskylshøjde (38,5 x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Observeret opskylshøjde	Simuleret ankomst første bølge	Observeret ankomst første bølge	Observeret ankomst største bølge
Nuugaatsiaq	2,3 – 9,4 m*	6 – 10 m	7 min	8 min	
Illorsuit	1,9 – 4,6 m	2 – 3 m	13 min		25 min
Qaarsut	0,6 – 1,7 m	3 m	26 min		
Niaqornat	1,2 m	store dønninger	23 min		
Uummannaq	0,5 – 1,4 m	store dønninger	30 min		53 min
Saattut	0,4 – 0,5 m	-	35 min		
Ukkusissat	0,8 – 1,0 m	-	26 min		
Ikerasak	0,6 – 0,8 m	-	38 min		

\* Uden for det bebyggede område i Nuugaatsiaq blev der simuleret højere opskylshøjder op til 10-15 m.

## Tsunamimodellering for Karrat 1, 2 og 3

Tsunamimodelleringen er foretaget for potentielle fjeldskred fra Karrat 1 (13 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>) og Karrat 2 (11 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>) samt to scenarier for Karrat 3: fjeldskred fra Blok A+B, dvs. det samlede ustabile område over havniveau (524 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, kaldt 'full' i NGI's rapport) og fjeldskred fra Blok B (412 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, kaldt 'lower' i NGI's rapport). Der er i modelleringen

benyttet tre realistiske friktionsvinkler (5°, 10°, 15°) for at afspejle usikkerheden i modelleringerne. Efter aftale med Departementet for Forskning og Miljø rapporteres herunder de højeste opskylsestimer (5° friktionsvinkel). I tillæg rapporteres opskylshøjder ved højvande, dvs. 2 m over middelvandstand. For en nærmere illustration af sandsynlige spænd af opskylshøjder henvises til NGI's rapport.

Resultaterne af modelleringerne er vist med opskylshøjder i tabel 3 og beskrevet herunder med udgangspunkt i de berørte byer/bygder. Opskylshøjderne er angivet i et interval, hvilket afspejler, at tsunamibølgerne når forskellige højder afhængigt af den lokale topografi og batymetri. For Karrat 1 og 2 er der ikke signifikant opskyl for Qaarsut, Niaqornat, Uummannaq, Saattut, Ukkusissat og Ikerasak. Opskylskort for hver by/bygd er vist i figur 5-12.

Den beregnede tid til ankomst af den første bølge for Karrat 1, 2 og 3 er den samme som for 2017-fjeldskredet.

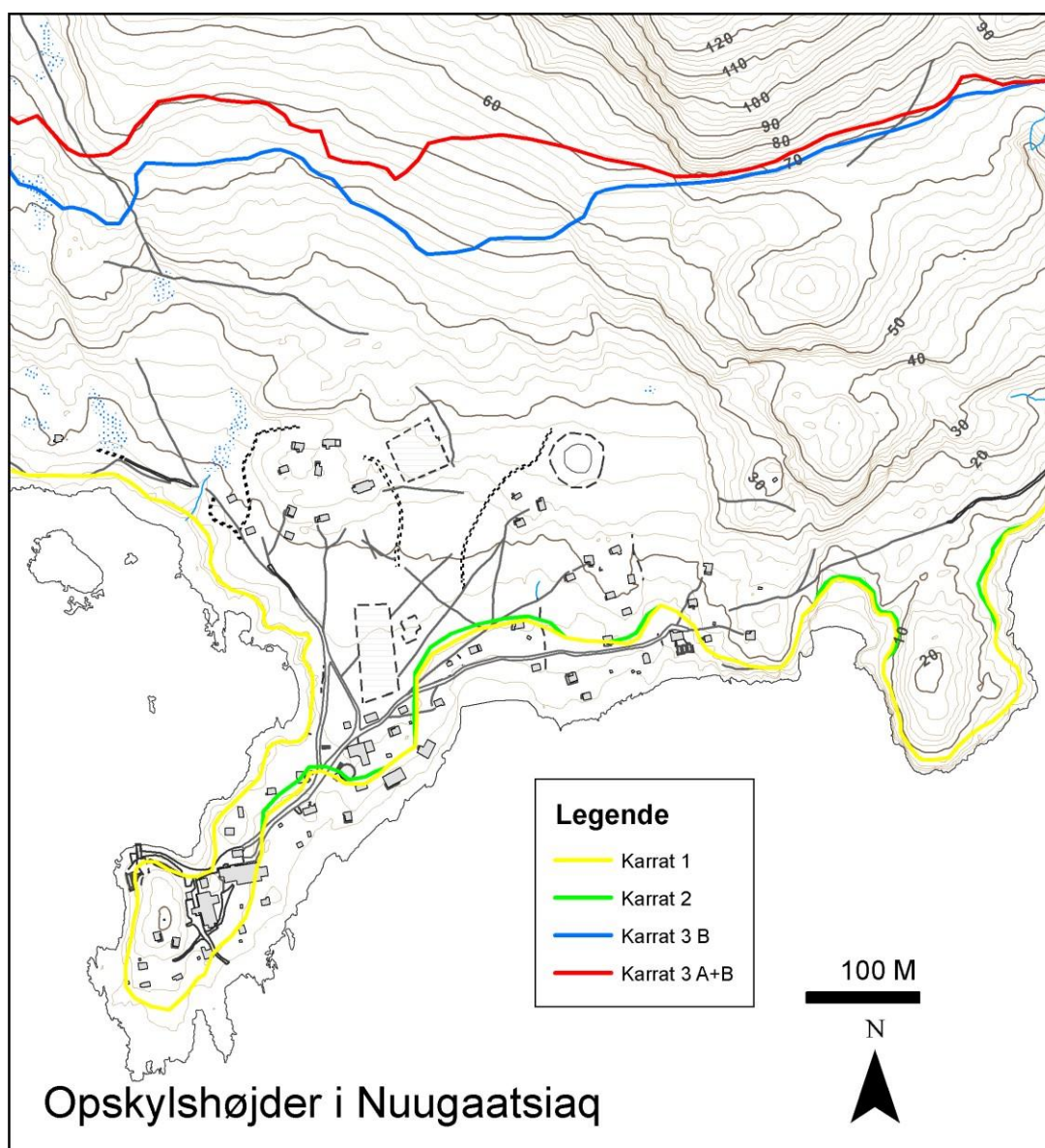
*Tabel 3: Simulerede ankomsttider og opskylshøjder for Karrat 1 og 2 samt de to scenarier for Karrat 3. Opskylshøjderne i tabellen er højeste estimer ved højvande på 2 m over middelvandstand. Opskylshøjderne er angivet i intervaller, som afspejler, at tsunamibølgerne når forskellige højder afhængigt af den lokale topografi og batymetri.*

	Tid til ankomst af første bølge	Opskylshøjde Karrat 1 (13 x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Opskylshøjde Karrat 2 (11 x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Opskylshøjde Karrat 3 Blok B (412 x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Opskylshøjde Karrat 3 Blok A+B (524 x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
Nuugaatsiaq	7 min	6 m	6 m	32 – 72 m	37 – 74 m
Illorsuit	13 min	3,7 m	3,9 m	19 – 35 m	20 – 43 m
Qaarsut	26 min	-	-	9 – 20 m	11 – 23 m
Niaqornat	23 min	-	-	9 – 14 m	11 – 17 m
Uummannaq	30 min	-	-	6 – 13 m	6 – 14 m
Saattut	35 min	-	-	4 – 10,5 m	5 – 10,5 m
Ukkusissat	26 min	-	-	5 – 6,5 m	5,5 – 7,5 m
Ikerasak	38 min	-	-	4 – 10 m	4,5 – 11 m

## Nuugaatsiaq

Opskylskortet for Nuugaatsiaq viser simulerede opskylshøjder for alle fire modelleringer ved højvande (+2 m) (figur 5). I Nuugaatsiaq giver modelleringerne for Karrat 3 ekstreme opskylshøjder på 32–74 m og bølger, der når over 500 m ind i land. Bygden vil dermed blive fuldstændigt oversvømmet. Karrat 1 og 2 modellerne giver opskyl på 6 m. Ankomsten af den første bølge er 7 minutter efter fjeldskredet.

	Tid til ankomst af første bølge	Karrat 1 ( $13 \times 10^6 \text{ m}^3$ )	Karrat 2 ( $11 \times 10^6 \text{ m}^3$ )	Karrat 3 Blok B ( $412 \times 10^6 \text{ m}^3$ )	Karrat 3 Blok A+B ( $524 \times 10^6 \text{ m}^3$ )
Nuugaatsiaq	7 min	6 m	6 m	32 – 72 m	37 – 74 m



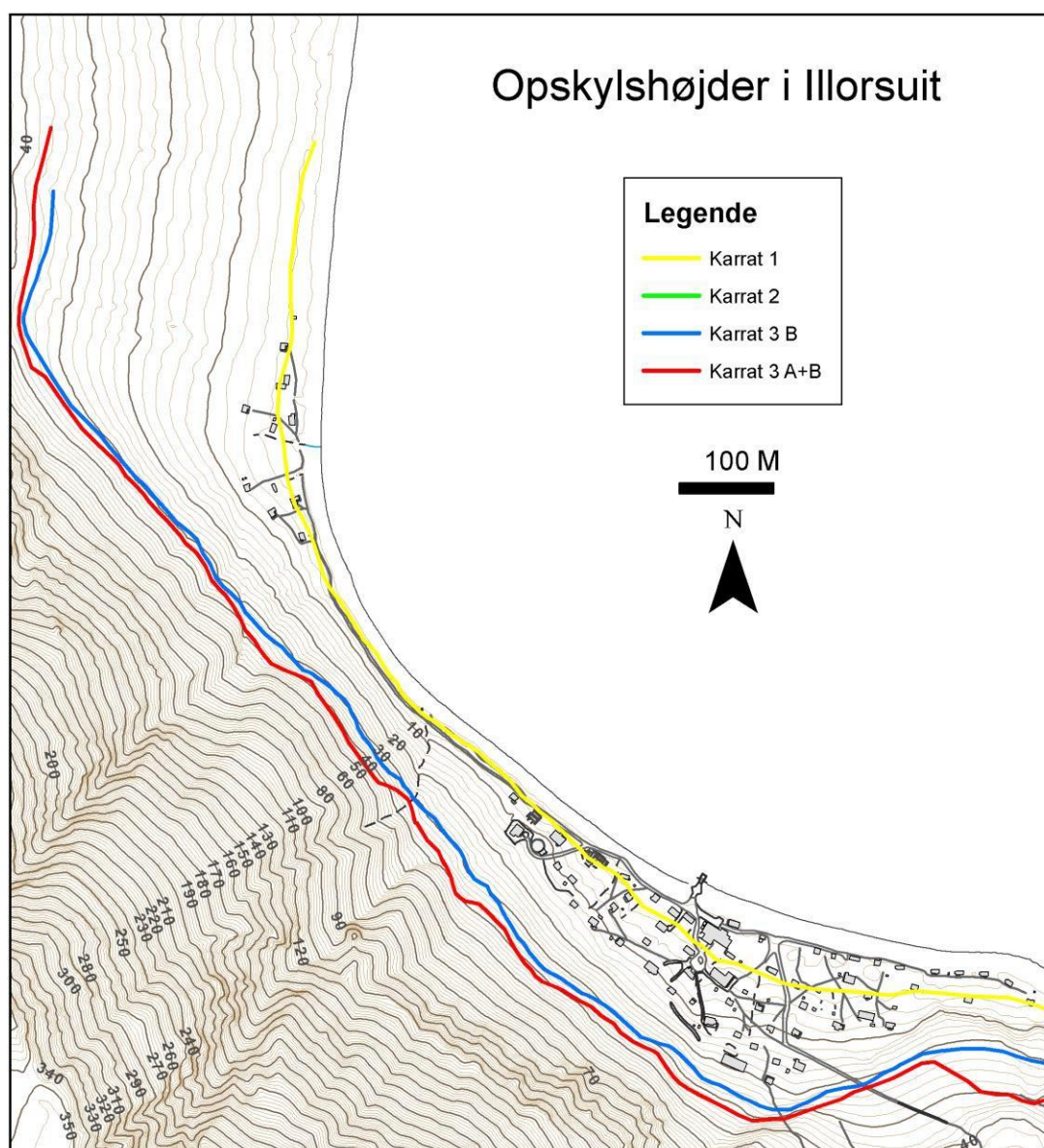
Figur 5: Opskylskort for Nuugaatsiaq med angivelse af tsunamimodellens højeste estimat af opskylshøjde ved højvande på 2 m over middelvandstand. Den grønne linje for Karrat 2 er til dels skjult bag den gule Karrat 1-linje. Det underliggende topografiske kort er fra Asiaq.



## Illorsuit

Opskylskortet for Illorsuit viser simulerede opskylshøjder for alle fire modelleringer ved højvande (+2 m) (figur 6). De simulerede opskylshøjder for Karrat 1 og 2 er ens (hvorfor den grønne linje ikke ses i figuren) og på 3,7–3,9 m i hele det bebyggede område. For de to Karrat 3 scenarier simuleres meget høje opskyl på op til 19–43 m, som oversvømmer hele det bebyggede område. Ankomsten af den første bølge er 13 minutter efter fjeldskredet.

	Tid til ankomst af første bølge	Karrat 1 (13 x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Karrat 2 (11 x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Karrat 3 Blok B (412 x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Karrat 3 Blok A+B (524 x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
Illorsuit	13 min	3,7 m	3,9 m	19 – 35 m	20 – 43 m

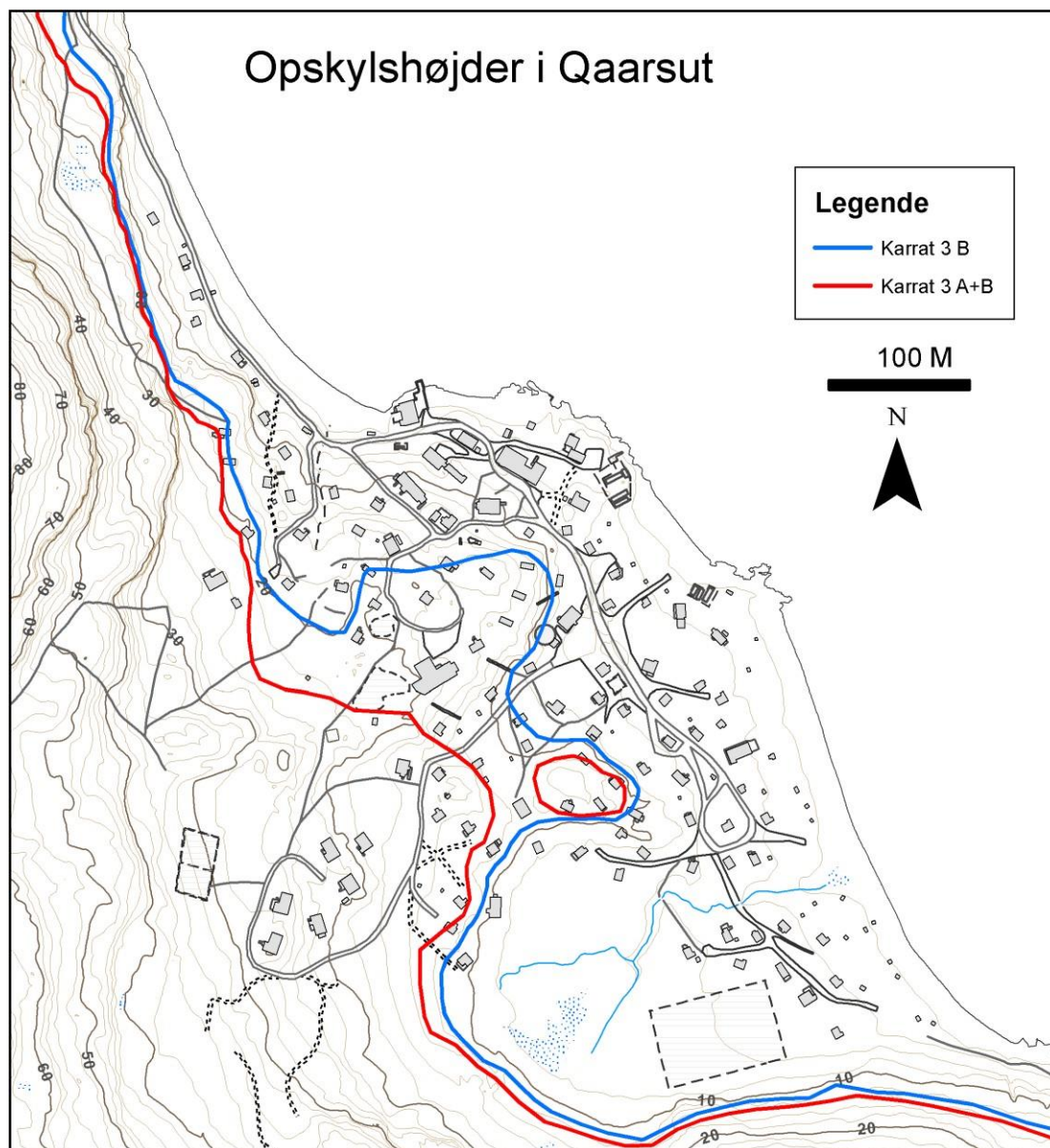


Figur 6: Opskylskort for Illorsuit med angivelse af tsunamimodellens højeste estimater af opskylshøjde ved højvande på 2 m over middelvandstand. Den grønne linje for Karrat 2 er helt skjult bag den gule Karrat 1-linje. Det underliggende topografiske kort er fra Asiaq.

## Qaarsut

Opskylskortet for Qaarsut viser simulerede opskylshøjder for modelleringer af skred fra Karrat 3 ved højvande (+2 m) (figur 7). For Qaarsut giver modelleringerne ekstreme opskylshøjder på 9–23 m, og bølgen når op til ca. 300 m ind i land i den sydlige del af bygden. En betydelig del af bygden bliver dermed oversvømmet i dette scenarie. Ankomsten af den første bølge er 26 minutter efter fjeldskredet.

	Tid til ankomst af første bølge	Karrat 3 Blok B (412 x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Karrat 3 Blok A+B (524 x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
Qaarsut	26 min	9 – 20 m	11 – 23 m



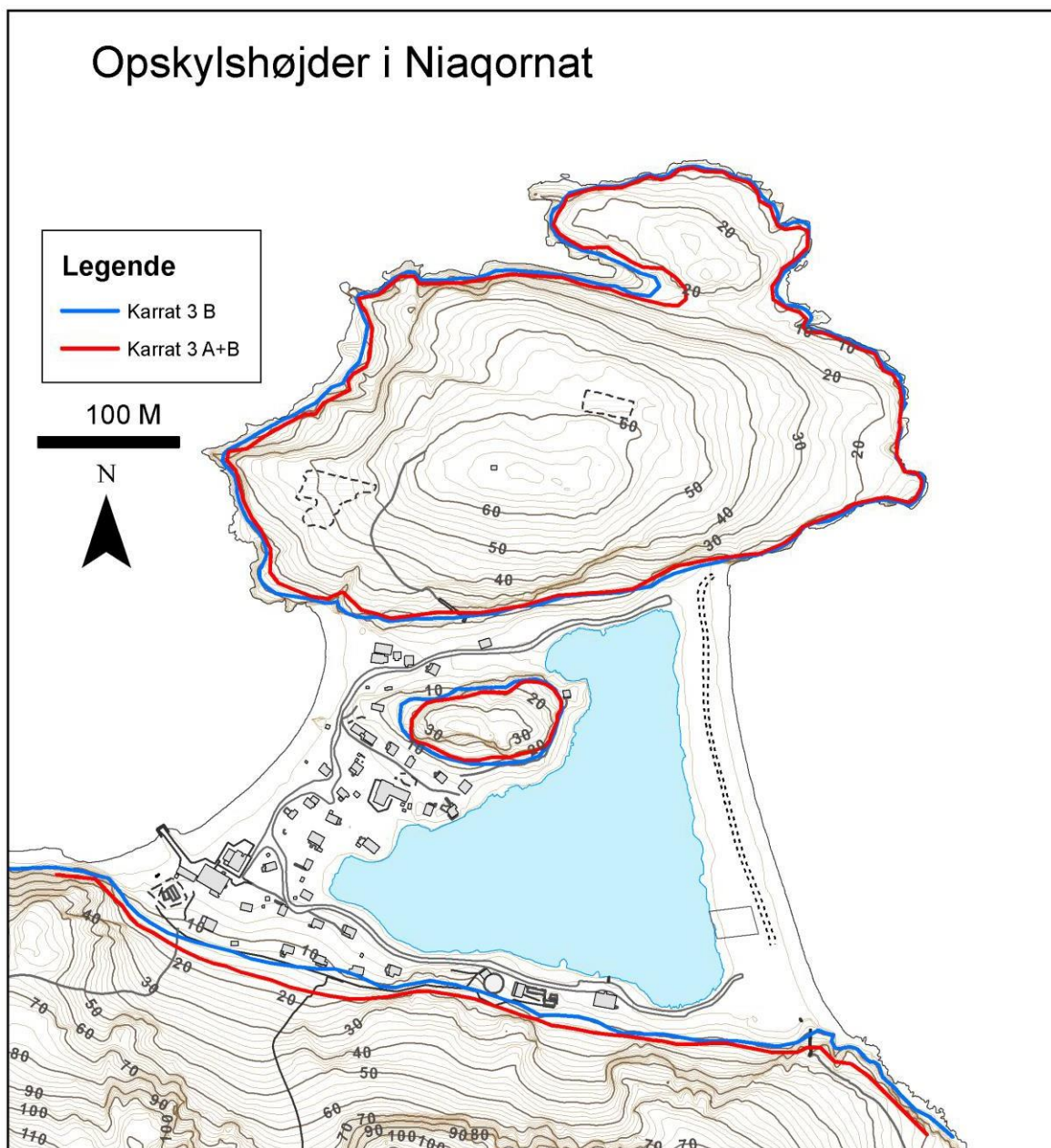
Figur 7: Opskylskort for Qaarsut med angivelse af tsunamimodellens højeste estimat af opskylshøjde ved højvande på 2 m over middelvandstand. Det underliggende topografiske kort er fra Asiaq.



## Niaqornat

Opskylskortet for Niaqornat viser simulerede opskylshøjder for modelleringer af skred fra Karrat 3 ved højvande (+2 m) (figur 8). Modelleringen giver ekstreme opskylshøjder på 9–17 m, og hele bygden bliver dermed oversvømmet, da den ligger relativt lavt. Ankomsten af den første bølge er 23 minutter efter fjeldskredet.

	Tid til ankomst af første bølge	Karrat 3 Blok B (412 x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Karrat 3 Blok A+B (524 x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
Niaqornat	23 min	9 – 14 m	11 – 17 m



Figur 8: Opskylskort for Niaqornat med angivelse af tsunamimodellens højeste estimat af opskylshøjde ved højvande på 2 m over middelvandstand. Det underliggende topografiske kort er fra Asiaq.

## Uummannaq

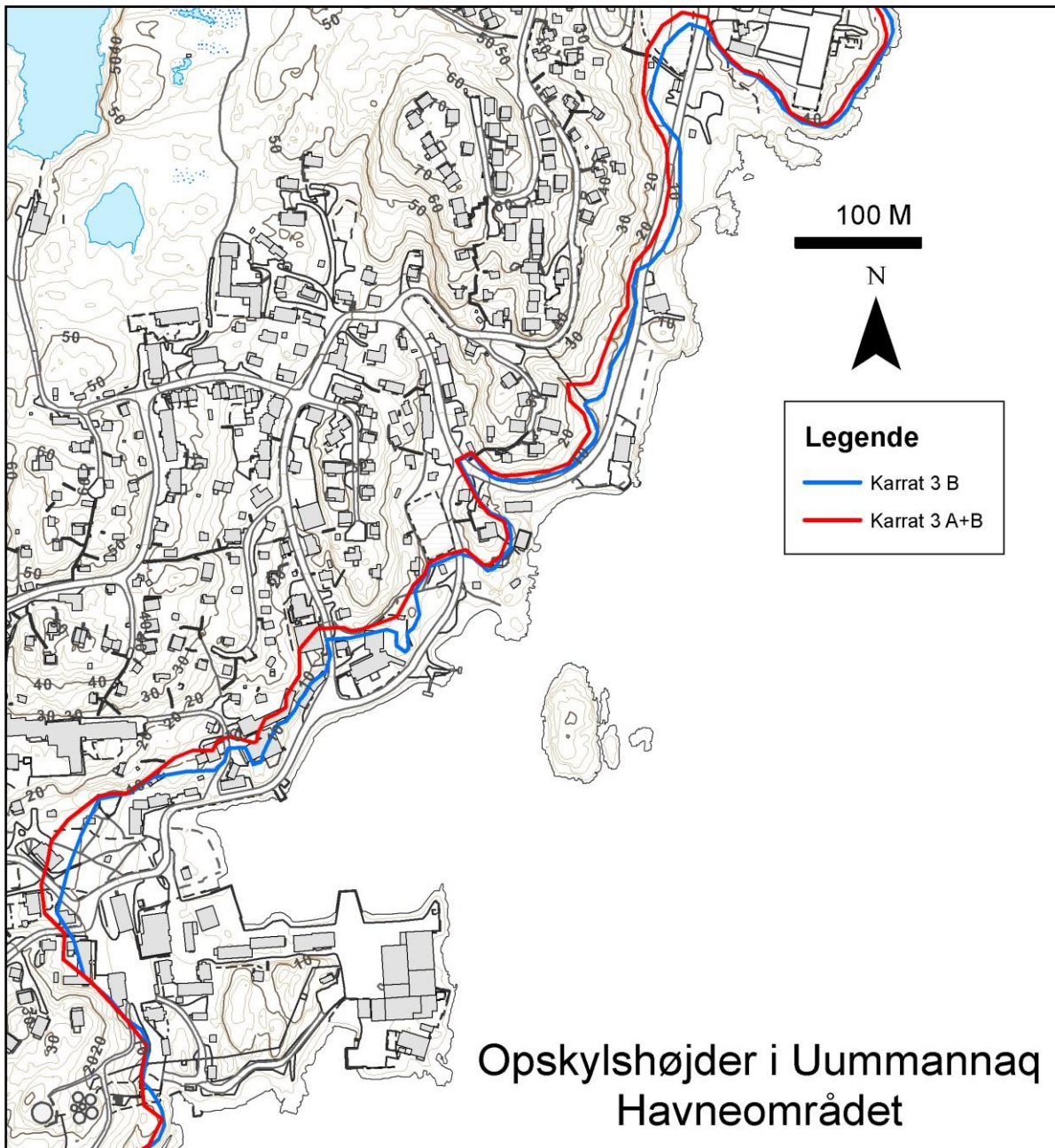
Opskylskortene for Uummannaq viser simulerede opskylshøjder for modelleringer af skred fra Karrat 3 ved højvande (+2 m) (figur 9a og 9b). Modelleringerne forudsiger høje bølger for dele af det beboede område fra havnen og nordpå. Der simuleres 6–14 meters opskylshøjde, og bølgen kan nå mere end 100 m ind i land, (figur 9b). Hovedparten af Uummannaq ligger imidlertid uden for den oversvømmede zone (figur 9a). Ankomsten af den første bølge er 30 minutter efter fjeldskredet.

	Tid til ankomst af første bølge	Karrat 3 Blok B (412 x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Karrat 3 Blok A+B (524 x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
Uummannaq	30 min	6 – 13 m	6 – 14 m



Figur 9a: Opskylskort for Uummannaq med angivelse af tsunamimodellens højeste estimat af opskylshøjde ved højvande på 2 m over middelvandstand. Højdekurveafstanden er 10 m. Den orange ramme viser udsnittet i figur 9b. Det underliggende topografiske kort er fra Asiaq.



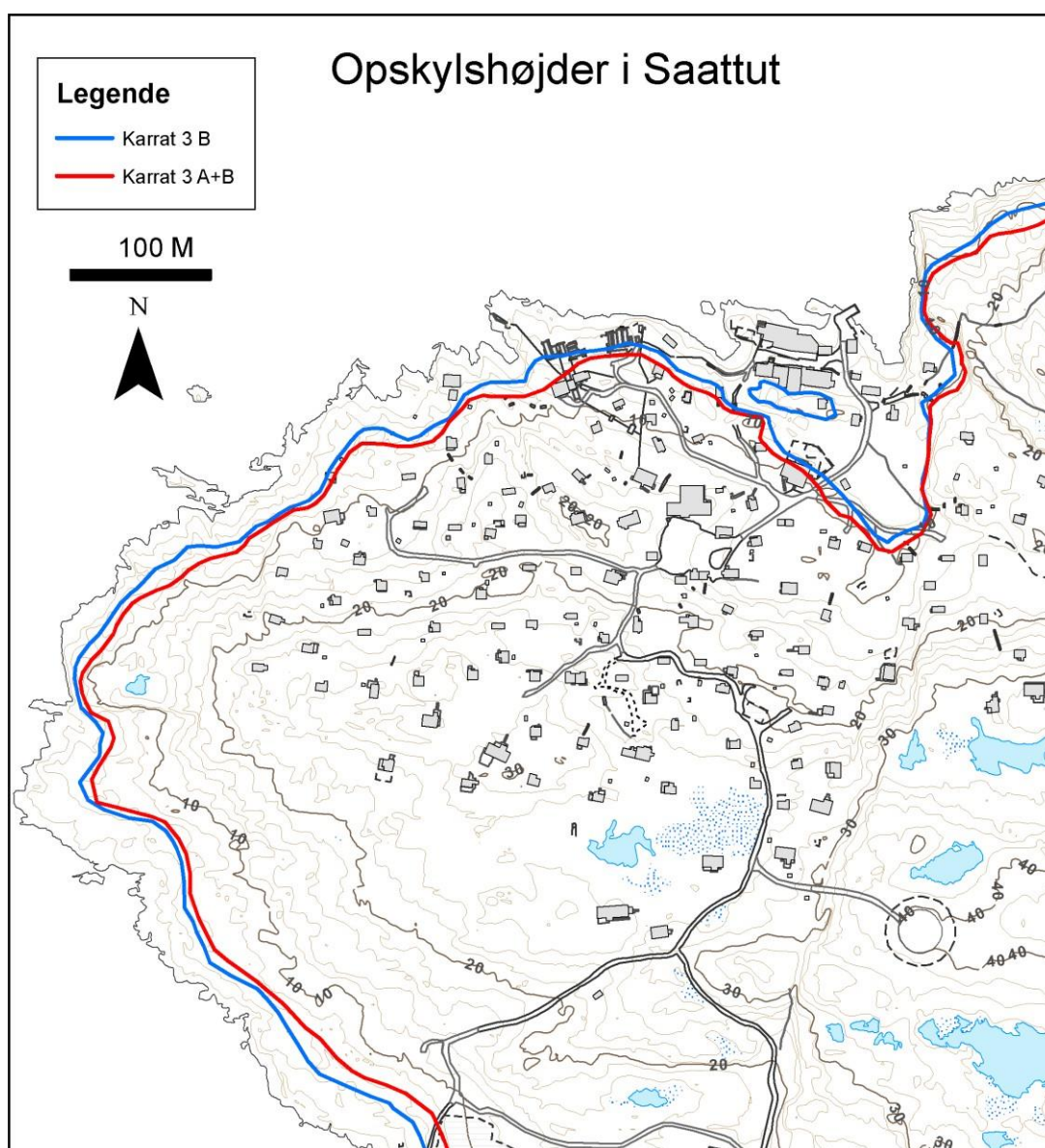


Figur 9b: Opskylskort for Uummannaq havneområde med angivelse af tsunamimodellens højeste estimat af opskylshøjde ved højvande på 2 m over middelvandstand. Højdekurveafstanden er 2 m. Det underliggende topografiske kort er fra Asiaq.

## Saattut

Opskylskortet for Saattut viser simulerede opskylshøjder for modelleringer af skred fra Karrat 3 ved højvande (+2 m) (figur 10). Modelleringerne viser en begrænset lokal oversvømmelse med en maksimal opskylshøjde på 10,5 m, der løber ca. 100 m ind i landet omkring bugten ved havnen, hvor flere bygninger ligger. Bugtens form synes at forstærke oversvømmelsen på grund af fokusering af bølgerne. Langs resten af kysten er opskylshøjderne mere begrænsede, typisk maksimalt på 4–6 m, der løber 20–30 m ind i landet. Ankomsten af den første bølge er 35 minutter efter fjeldskredet.

	Tid til ankomst af første bølge	Karrat 3 Blok B (412 x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Karrat 3 Blok A+B (524 x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
Saattut	35 min	4 – 10,5 m	5 – 10,5 m



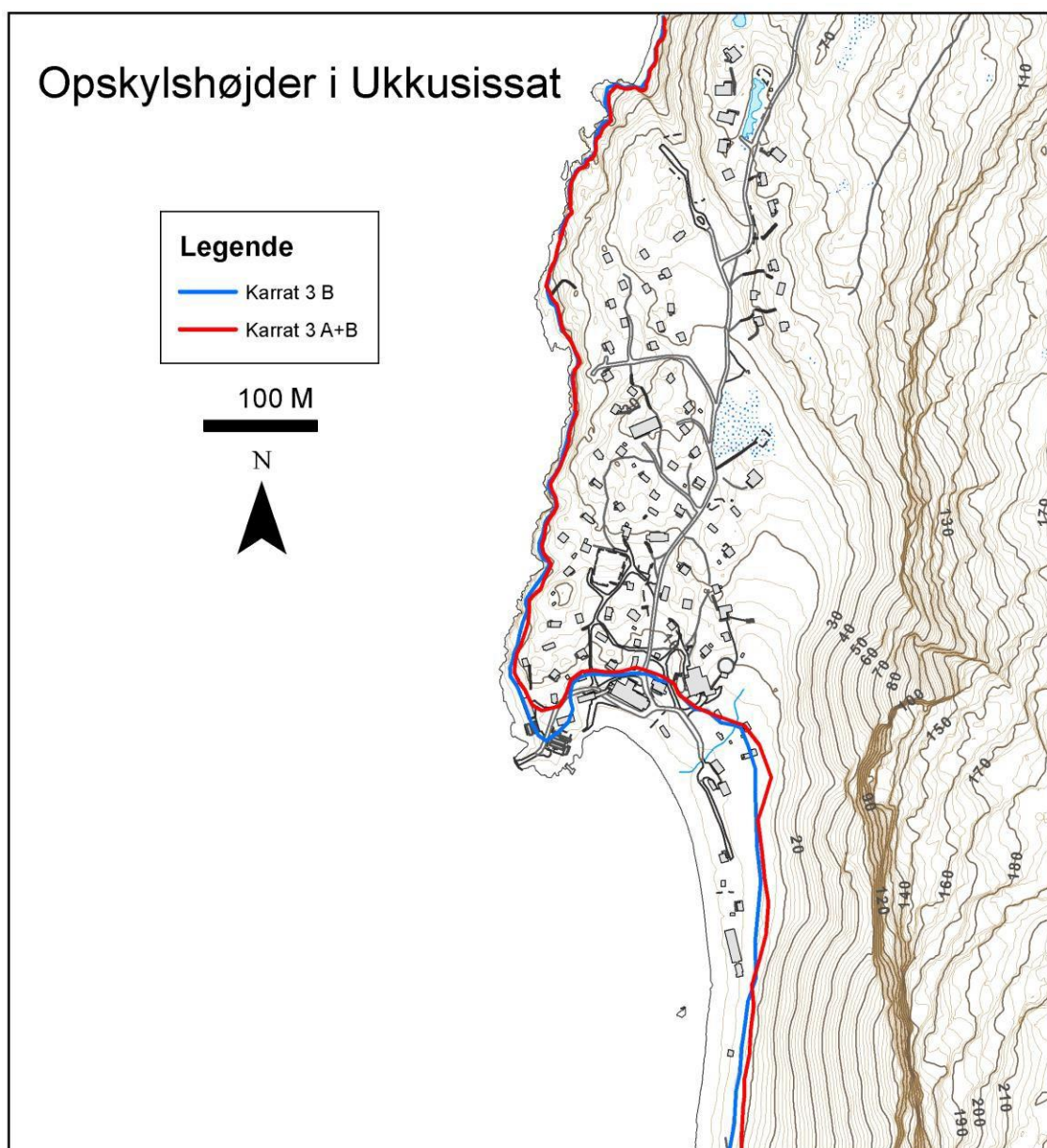
Figur 10: Opskylskort for Saattut med angivelse af tsunamimodellens højeste estimat af opskylshøjde ved højvande på 2 m over middelvandstand. Det underliggende topografiske kort er fra Asiaq.



## Ukkusissat

Opskylskortet for Ukkusissat viser simulerede opskylshøjder for modelleringer af skred fra Karrat 3 ved højvande (+2 m) (figur 11). Modelleringerne for Ukkusissat giver maksimale opskylshøjder på op til 5–7,5 m, hovedsagelig i bugten hvor bølgen når ca. 50–75 m ind i land. Flere bygninger ligger indenfor denne zone. Ankomsten af den første bølge er 26 minutter efter fjeldskredet.

	Tid til ankomst af første bølge	Karrat 3 Blok B (412 x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Karrat 3 Blok A+B (524 x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
Ukkusissat	26 min	5 – 6,5 m	5,5 – 7,5 m



Figur 11: Opskylskort for Ukkusissat med angivelse af tsunamimodellens højeste estimat af opskylshøjde ved højvande på 2 m over middelvandstand. Det underliggende topografiske kort er fra Asiaq.

## Ikerasak

Opskylskortet for Ikerasak viser simulerede opskylshøjder for modelleringer af skred fra Karrat 3 ved højvande (+2 m) (figur 12). Modelleringerne for bygden viser opskylshøjder på op til 11 m i området omkring havnen, hvor flere bygninger ligger. De resterende områder får moderate bølger på 4–6 m højde. Ankomsten af den første bølge er 38 minutter efter fjeldskredet.

	Tid til ankomst af første bølge	Karrat 3 Blok B (412 x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Karrat 3 Blok A+B (524 x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
Ikerasak	38 min	4 – 10 m	4,5 – 11 m



Figur 12: Opskylskort for Ikerasak med angivelse af tsunamimodellens højeste estimat af opskylshøjde ved højvande på 2 m over middelvandstand. Det underliggende topografiske kort er fra Asiaq.



## Sammenligning med tsunamimodellering af prof. Patrick J. Lynett

Asiaq fik i januar 2021 udført en tsunamimodellering af prof. Patrick J. Lynett fra University of Southern California. I tabel 4 er en sammenligning mellem de simulerede opskylshøjder og ankomsttider fra Patrick J. Lynetts "worst case" model for Karrat 3 med et volumen på  $380 \times 10^6 \text{ m}^3$  og NGI's scenarier. Volumen, som er brugt i Lynetts simulering, stammer fra GEUS-notatet af 9. oktober 2020, hvor det blev vurderet, at volumen over havniveau var mindst  $380 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Volumenerne, som er brugt i nærværende tsunamimodellering af NGI, er baseret på detaljerede profilanalyser af brudfladens udbredelse inde i fjeldet, hvilket giver større volumener.

En væsentlig metodisk forskel på de to tsunamimodelleringer er, at Lynetts modellering giver en enkelt konstant opskylshøjde for hver by/bygd, mens NGI's modellering giver mere varierende opskylshøjder, som afspejler de lokale batymetriske og topografiske forhold. NGI's simulerede opskylshøjder er generelt lidt højere end dem fra Lynett, hvilket nok til dels skyldes, at de modellerede volumener er højere.

I Asiaq-notatet af 21. januar 2021 vurderede Lynett, at *opskylshøjder vil være lavere ved et sammenhængende havisdække*. NGI bemærker, at havis menes at have en effekt, men at der er meget lidt data for, hvordan havisdække vil påvirke dannelsen og størrelsen af en tsunami.

*Tabel 4: Sammenligning af NGI's tsunamimodellering med modellering af Patrick J. Lynett. Opskylshøjderne er angivet relativt til normal vandstand.*

	NGI - tid til første bølge	Lynett - tid til første bølge	NGI Karrat 3 Blok B ( $412 \times 10^6 \text{ m}^3$ )	NGI Karrat 3 Blok A+B ( $524 \times 10^6 \text{ m}^3$ )	Lynett Karrat 3 "worst case" ( $380 \times 10^6 \text{ m}^3$ )
Nuugaatsiaq	7 min	7 min	30 – 70 m	35 – 72 m	28,4 m
Illorsuit	13 min	12 min	17 – 33 m	18 – 41 m	8,7 m
Qaarsut	26 min	26 min	7 – 18 m	9 – 21 m	4,8 m
Niaqornat	23 min	25 min	7 – 12 m	9 – 15 m	3,8 m
Uummanaq	30 min	31 min	4 – 11 m	4 – 12 m	4,0 m
Saattut	35 min	32 min	2 – 8,5 m	3 – 8,5 m	1,3 m
Ukkusissat	26 min	28 min	3 – 4,5 m	3,5 – 5,5 m	1,6 m
Ikerasak	38 min	42 min	2 – 8 m	2,5 – 9 m	1,2 m

## Afsluttende kommentarer og konklusioner

NGI's tsunamimodellering for 2017-fjeldskredet giver en god overensstemmelse med observationerne af opskylshøjder og ankomsttider, hvilket indikerer, at modelleringen giver et retvisende billede af de faktiske forhold, og at modelleringen er egnet til at udføre simuleringer for potentielle fjeldskred fra Karrat 1, 2 og 3.

Tsunamimodelleringerne fra NGI viser, at et fjeldskred fra Karrat 3 vil medføre meget store opskylshøjder i Uummannaqs fjordsystem (tabel 1). Den nærmeste bygd, Nuugaatsiaq, vil blive ramt af første bølge efter syv minutter og den fjerneste bygd efter 38 minutter. Modelleringerne viser ekstreme opskylshøjder for flere af byerne og bygderne. Nuugaatsiaq, Illorsuit og Niaqornat oversvømmes fuldstændigt, imens Qaarsut og Uummannaq vil opleve meget høje opskylshøjder. Oversvømmelserne er mere lokale i Saattut, Ukkusissat og Ikerasak længere væk. Hertil genereres der så store bølger, at det kan være til fare for både på det åbne vand selv langt fra fjeldskredet. Fjeldskred fra Karrat 1 og 2 vil kun udgøre en risiko for Nuugaatsiaq og Illorsuit, men kan medføre stærk strøm i havnene i andre byer og bygder.

NGI vurderer, at usikkerhederne på de modellerede opskyl i de berørte byer og bygder stiger med afstanden fra skredet. De vurderer, at usikkerheden på resultaterne primært relaterer sig til fjeldskreddets dynamik og dannelsen af tsunamien, herunder sandsynligheden for at store volumener falder ned på en gang. En bedre forståelse af 2017-skreddets aflejringer i fjorden vil potentielt kunne reducere usikkerhederne i fjeldskreddets dynamik. Et bedre kendskab til sandsynligheden for fjeldskred fra forskellige dele af Karrat 3 vil øge forståelsen af risikoen forbundet med det store ustabile område. Dette vil dog kræve flere års omfattende monitoring af fjeldsidens bevægelser, og det ændrer ikke på de modellerede opskylshøjder ved "worst case scenario". En anden kilde til usikkerhed vurderes at være de sparsomme data, der ligger til grund for batymetrien nær byer og bygder. Men da et fjeldskred fra Karrat 3 potentielt vil være meget stort, vil det overordnede billede med meget høje opskylshøjder dog ikke ændre sig væsentligt ved bedre batymetri-data.

Ved tsunamien 17. juni 2017 blev det observeret, at den første bølge ikke var den største, og modelleringerne indikerer, at det samme kunne blive tilfældet for en tsunami udløst af Karrat 3. Observationer af og viden om unormal bølgeaktivitet kan dermed potentielt give folk mulighed for at evakuere til højere terræn, men NGI påpeger, at der ikke er nogen garanti for, at dette er tilfældet.

I forbindelse med tsunamimodelleringen har GEUS igen vurderet de 3 ustabile områder på den sydvendte kyst af Karrat Fjorden. GEUS ser fortsat stor aktivitet i de aktive områder i Karrat Fjorden ved analyser af satellitbilleder. På baggrund af bevægelseshistorikken og de aktuelle bevægelser i de ustabile områder vurderer GEUS, at der er større sandsynlighed for fjeldskred fra Karrat 1 og 2 end fra Karrat 3. Til gengæld er konsekvensen af et fjeldskred fra Karrat 3 meget større end for Karrat 1 og 2, da en tsunami fra Karrat 3 kan ramme alle byer og bygder i Uummannaqs fjordsystem. GEUS vurderer derfor, at de kritiske områder Karrat 1, 2 og 3 udgør en uændret meget høj risiko for alvorlige fjeldskred og dermed ligeledes en uændret meget høj risiko for tsunamier.

Det er ikke muligt at forudsige hvornår eller præcist hvor, de næste større fjeldskred vil forekomme i Karrat Fjord-området. Da der er flere kritiske områder med meget høj risiko, må det ligeledes fortsat forventes, at der også efter et næste større fjeldskred stadig vil være meget høj risiko for nye alvorlige fjeldskred.

## Referencer

NGI report no 20200823-01-R, 26/03/2021: Tsunami hazard screening for Uummannaq fjord system – Greenland. Hazard scenario simulations and 2017 event hindcast

Asiaq Notat, 21/01/2021: Fjeldskredspotentiale ved Karrat 3 og tilknyttede opskylskort for Niaqornat, Qaarsut og Uummannaq

Asiaq Notat, 04/01/2021: Fjeldskredspotentiale ved Karrat 3 og tilknyttede opskylskort ved Illorsuit.

GEUS Notat, 09/10/2020: GEUS Notat om risiko for fjeldskred og tsunamibølger i Karrat Fjorden – Status for faglig viden oktober 2020.

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

Paris, A., E. A. Okal, C. Guérin, P. Heinrich, F. Schindelé, and H. Hébert, 2019. Numerical Modeling of the June 17, 2017 Landslide and Tsunami Events in Karrat Fjord, West Greenland. *Pure and Applied Geophysics* 176 (7), 3035–3057.