

Permafrost som geologisk barriere på Svalbard

METODER, VERKTØY OG ARBEIDSFLYT FOR
RISIKOVURDERING AV PLANLAGTE
DEPONILOKALITETER PÅ SVALBARD

DOK.NR. 20180397-02-R
REV.NR. 0 / 2021-02-22

Ved elektronisk overføring kan ikke konfidensialiteten eller autentisiteten av dette dokumentet garanteres. Adressaten bør vurdere denne risikoen og ta fullt ansvar for bruk av dette dokumentet.

Dokumentet skal ikke benyttes i utdrag eller til andre formål enn det dokumentet omhandler. Dokumentet må ikke reproduseres eller leveres til tredjemann uten eiers samtykke. Dokumentet må ikke endres uten samtykke fra NGI.

Neither the confidentiality nor the integrity of this document can be guaranteed following electronic transmission. The addressee should consider this risk and take full responsibility for use of this document.

This document shall not be used in parts, or for other purposes than the document was prepared for. The document shall not be copied, in parts or in whole, or be given to a third party without the owner's consent. No changes to the document shall be made without consent from NGI.



Prosjekt

Prosjekttittel: Permafrost som geologisk barriere på Svalbard
Dokumenttittel: Metoder, verktøy og arbeidsflyt for risikovurdering av planlagte deponilokaliteter på Svalbard
Dokumentnr.: 20180397-02-R
Dato: 2021-02-22
Rev.nr. / Rev.dato: 0 /

Oppdragsgiver

Oppdragsgiver: Svalbard Miljøvernfond
Kontaktperson: Hanne Eriksen
Kontraktreferanse: 18/00228-2

for NGI

Prosjektleder: Gijs Breedveld
Utarbeidet av: Gijs Breedveld, Regula Frauenfelder, Unni Eidsvig, Christian Jaedicke, Ørjan Nerland, Kjersti Gisnås, Luca Piciullo
Kontrollert av: Gudny Okkenhaug

Sammendrag

Prosjektet "Permafrost som geologisk barriere", finansiert gjennom Svalbard Miljøvernfond, har som målsetning å forstå i hvilken grad permafrost er en fungerende geologisk barriere i tilknytning til deponier på Svalbard. Dette gjelder både eksisterende deponier for avfall fra lokalsamfunn og gruvevirksomhet, samt planlegging av fremtidige deponier. Prosjektets mål er å etablere et verktøy for hvordan man best kan utføre en miljørisikovurdering med tanke på valg av fremtidige deponilokaliteter i områdene rundt bosetningene på Svalbard. Dette krever en integrering av ulike faktorer som vil være kritisk for den langsiktige risiko et deponi vil kunne utgjøre:

- ↗ Fremtidig klima som forventes å bli varmere i arktiske strøk.
- ↗ Permafrostens tilstand og utbredelse.
- ↗ Skredfare (snø, sørpe, stein) i terrenget.
- ↗ Geoteknisk stabilitet av grunnen.
- ↗ Hydrologiske og hydrogeologiske forhold.
- ↗ Avfallskarakterisering.

Et verktøy er utviklet som integrerer mulige risikomomenter som er styrt av både fysiske, kjemiske og biologiske faktorer. Metodikken for risikovurdering gjør det mulig å integrere disse ulike aspekter i en kvalitativ risikovurdering. Dette gjør det mulig å vurdere ulike deponilokaliteter i forhold til hverandre, både med hensyn til eksisterende og potensiell fremtidig risiko. Det gjøres oppmerksom på at verktøyet har fokus på deponiets livsfase som omfatter drift, avslutning og etterdrift. Risiko ved prosjektering og etablering av deponiet er ikke omfattet av verktøyet som presenteres her.

Risiko og sårbarhetsanalyse legges til grunn i metodikken som omfatter følgende trinn:

- ↗ Risikoidentifikasjon: Hva kan gå galt?
- ↗ Risikoanalyse: Hva er sannsynligheten for at det går galt? Hva er konsekvensen av at det går galt?
- ↗ Risikoevaluering: Er risikoen akseptabel?

Det er definert 5 sannsynlighetsklasser og 5 konsekvensklasser i risikoanalysefasen. Dette fører til en 5 x 5 risikomatrix som danner grunnlaget for risikoevalueringen. Basert på evalueringen vurderes risikoen til å være lav, middels eller høy med resulterende behov/ikke behov for tiltak til å redusere risikoen.

Metodikken har blitt anvendt på et planlagt fremtidig deponi for skeidestein, aske og slagg i Barentsburg der NGI har utført innledende undersøkelser i 2018.

Utprøving viser at metodikken er egnet til å identifisere de lokale forhold som er kritisk for langsiktig lagring av avfall og overskuddsmasser. Dette vil være styrende for kvantitative studier som legges til grunn for detaljdesign av deponier.

Innhold

1	Innledning	6
1.1	Bakgrunn	6
1.2	Tidligere undersøkelser	7
1.3	Målsetningen med arbeidet	7
1.4	Oppbygging av dokumentet	8
2	Risikovurderingsmetodikk	9
2.1	Overordnede prinsipper	9
2.2	Helhetlig risiko- og sårbarhetsanalyse (ROS)	10
2.3	Miljøkjemisk risikovurdering	12
2.4	Risikovurdering av geofarar	14
2.5	Akseptkriterier for dammer	17
3	Forslag til en integrert risikovurdering for deponier	18
3.1	Trinnvis fremgangsmåte	18
3.2	Kvalitativ risikovurdering	18
3.3	Kvantitativ risikovurdering	22
3.4	Usikkerheter	22
4	Anvendelse av metodikken - Eksempel	23
4.1	Bakgrunn	23
4.2	Vurdering av lokale forhold	25
4.3	Kvalitativ risikovurdering	28
5	Vurdering av metodikken	32
5.1	Forutsetninger	32
5.2	Fordeler og ulemper	32
6	Referanser	33

Kontroll- og referanseside

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Prosjektet "Permafrost som geologisk barriere", finansiert gjennom Svalbard Miljøvernfond har som målsetning å forstå i hvilken grad permafrost er en fungerende geologisk barriere i tilknytning til deponier på Svalbard. Dette gjelder både eksisterende deponier for avfall fra lokalsamfunn og gruvevirksomhet, samt planlegging av fremtidige deponier. Prosjektets mål er å etablere et verktøy for hvordan man best kan utføre en miljørisikovurdering med tanke på valg av fremtidige deponilokaliteter i områdene rundt Longyearbyen spesielt, men også for Svalbard generelt. Det gjøres oppmerksom på at verktøyet har fokus på deponiets livsfase som omfatter drift, avslutning og etterdrift. Risiko ved prosjektering og etablering av deponiet er ikke omfattet av verktøyet som presenteres her.

Dette krever en integrering av ulike faktorer som vil være kritisk for den langsiktige risikoen et deponi vil kunne utgjøre:

- **Fremtidig klima.** En deponilokalitet bør legges slik at deponiet ikke er unødvendig utsatt for, eller påvirket av, klimatiske variasjoner man forventer som en følge av et varmere arktisk klima, både på kort eller lang sikt som kan påvirke risikobildet negativt.
- **Permafrost** som geologisk barriere (bunn- og sidetetting). Permafrost er tradisjonelt ansett som en effektiv geologisk barriere i arktiske strøk. Permafrostens tilstand og utbredelse på en deponilokalitet må derfor avklares.
- **Skred** (snø, sørpe, stein). Det er viktig å påse at terrenget rundt et deponi ikke er utformet slik at det er fare for at ulike typer skred skal kunne treffe deponiet og/eller infrastruktur tilknyttet lokaliteten. Dette påvirker både deponiets stabilitet og sikkerheten til de som skal arbeide der.
- **Geoteknisk stabilitet** av grunnen. Dette er en forutsetning for at avfallet i deponiet skal ligge stabilt og at selve fyllingen samt fyllingens innhold ikke skal spre seg til omgivelsene.
- **Hydrologiske og hydrogeologiske forhold.** Et avfallsdeponi bør i størst mulig grad være skjermet for innlekkasje av større vannmengder, det være seg enten overflate-vann eller grunnvann. Det er deponiets barrierer (bunn-, side- og topptetting) som skal sørge for dette, uavhengig om barrierene er kunstige eller naturlige.
- **Avfallskarakterisering/avfallsforståelse.** Antatte avfallsfraksjoner som er planlagt deponert må vurderes i forhold til deres potensielle miljørisiko, basert på kjemisk sammensetning og egenskaper, både alene, men også i en situasjon der samdeponering av ulike avfallsfraksjoner forekommer.

1.2 Tidligere undersøkelser

NGI utførte høsten 2018 undersøkelser på to lokaliteter i nærheten av Longyearbyen, en mulig fremtidig deponilokalitet nedenfor Gruve 3 og ved eksisterende avfallsdeponi i nærheten av Gruve 6 (NGI, 2018a). Feltarbeidet har, i tillegg til feltobservasjoner av grunnforholdene på lokaliteten, fokusert rundt bruk av Elektrisk Resistivitets Tomografi (ERT) som undersøkelsesmetodikk. Denne teknikken er en geofysisk målemetode som har som mål og avdekke ulik ledningsevne i grunnen. Det er flere forhold som påvirker ledningsevne i grunnen. Både den lokale geologien, type og mengde av løsmasser, isinnhold og vannmetning er typiske forhold som gir ulike utslag for ledningsevne. Undersøkelser utført ved hjelp av ERT avdekket variasjoner i utbredelsen av permafrost i grunnen på de to undersøkelsesområdene. Variasjoner i det aktive laget og det aktive lagets påvirkning fra overflatevann er også avdekket. I områder med betydelig overvannsføring, som for eksempel bekkefar og elveleier, ser man en økning i tykkelsen på det aktive laget samtidig som permafrostens egenskaper tilsynelatende skiller seg noe fra omkringliggende områder. Basert på ERT data ble det på begge lokaliteter imidlertid påvist utstrakt permafrost i grunnen. Det aktive laget hadde typisk en mektighet på 1,5 til 2 m.

Den samme undersøkelsesmetodikk ble anvendt for å vurdere en ny deponilokalitet for skeidestein, aske og slagg i Barentsburg (NGI, 2018b). Tykkelse og variasjon i det aktive laget og dyp til permafrost ble vurdert langs fire profillinjer. Målt tykkelse av det aktive laget varierer fra ca. 2 til 4 m. Største mektighet er assosiert med isolerte aktive, eller nylig aktive bekkefar og elveleier der vann fra høyereliggende områder transporteres ned til Grønfyorden. Dyp til permafrost varierer med mektigheten av det aktive laget. Med unntak av noen få mindre og avgrensede områder fremsto permafrosten på de undersøkte lokaliteten som en sammenhengende og homogen romlig dybde basert på ERT målingene. Effekten av fremtidige klimatologiske endringer på deponiets fysiske og kjemiske stabilitet i forhold til ytre miljøet ble vurdert.

Undersøkelsene viser at ERT kan være et viktig supplerende verktøy i kartlegging av både det aktive laget, topp permafrost og topp berg på Svalbard. Teknikken er også skånsom for naturen og setter ikke varige og skjemmende spor i terrenget. Dermed er det mulig å følge med på endringer i permafrost som følge av klimatologiske endringer på lang sikt for å verifisere om risikoen for uønskede hendelser øker.

1.3 Målsetningen med arbeidet

Som nevnt i innledningen vil egnethet av et deponi og mulige risikomomenter være avhengig av mange faktorer, både fysiske, kjemiske og biologiske. Målsetningen med foreliggende studie er å vurdere verktøy og metoder for risikovurdering som gjør det mulig å integrere disse ulike aspekter i en tverrfaglig risikovurdering med hensikten å kunne vurdere ulike deponilokaliteter i forhold til eksisterende eller mulig fremtidig risiko.

Hovedutfordringen er å kunne integrere den miljøkjemiske risikovurderingssystematikk med den geofaglige risikovurderingssystematikk:

- Ved deponering av avfall er en miljøkjemisk risikovurdering basert på vurdering av ulike typer avfall, utlekkingspotensialet, sprednings- og eksponeringsrisiko av kjemiske forbindelser for mennesker og miljøet.
- En geofaglig risikovurdering vil være basert på stabiliteten av deponiet, muligheten for fysisk ødeleggelse av barrierer og fysisk spredning av materialet.

1.4 Oppbygging av dokumentet

En oversikt over de ulike eksisterende tilnærminger til risikovurdering fra et miljøkjemisk og geofaglig perspektiv blir presentert i kapittel 2. Risikogrenser og akseptkriterier som håndteres i ulike fagdisipliner blir presentert.

Basert på disse tilnærminger er det utviklet et forslag til et integrert risikovurderingsverktøy for deponier i arktiske omgivelser, der ulike disipliner inngår i en analyse av uønskede hendelser og en kvalitativ vurdering av sannsynlighet og konsekvens som presenteres i kapittel 3.

Metodikken har blitt anvendt på ett eksempel som presenteres i kapittel 4. Metodikken vurderes og muligheter samt utfordringer til å komme frem til en integrasjon av de ulike disipliner i en kvantitativ risikovurdering beskrives i kapittel 5.

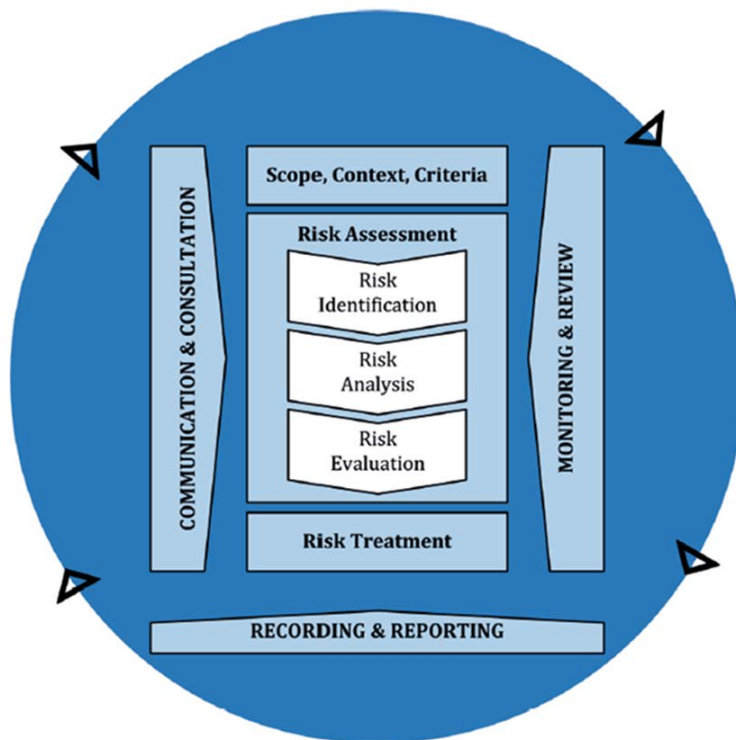
2 Risikovurderingsmetodikk

2.1 Overordnede prinsipper

Hovedtrinnene som utgjør en risikovurdering er:

- ↗ Identifikasjon av uønskede hendelser
- ↗ Vurdering av sannsynligheten for at hendelsene skjer
- ↗ Konsekvensene av hendelsene
- ↗ Risiko = Sannsynlighet × Konsekvens av hendelsen
- ↗ Vurdering om risikoen er akseptabel ut ifra gitte kriterier

Denne strukturen fremgår også av ISOs rammeverk for *Risikostyring* (NS-ISO 31000:2018) som primært er beregnet for virksomheter og beskriver 3 generelle faser. Disse har en allmenn gyldighet for ulike prosesser som skal risikovurderes (Figur 1).



Figur 1. Rammeverk for risikostyring fra ISO 31000: 2018.

Før man kommer i gang med risikovurderingen bør systemet avgrensnes ved en *Definisjon av kontekst og omfang av analysen*. Deretter består risikovurderingen av å besvare følgende spørsmål:

- ↗ Risikoidentifikasjon: Hva kan gå galt?
- ↗ Risikoanalyse: Hva er sannsynligheten for at det går galt? Hva er konsekvensen av at det går galt?
- ↗ Risikoevaluering: Er risikoen akseptabel?

Hvis risikoen er vurdert til å være uakseptabel, vil neste fase bestå i å iverksette risikoreducerende tiltak: Hva kan gjøres for å begrense risikoen? Dette kan være å redusere sannsynligheten at hendelsen inntreffer eller begrense konsekvensene av hendelsen.

Basert på disse generelle prinsipper har ulike fagdisipliner ulike tilnærminger til risikovurdering. En oversikt over de ulike tilnærminger fra et miljøkjemisk og geofaglig perspektiv blir presentert i dette kapittelet. Praksis med bruk av risikogrenser og akseptkriterier for de ulike fagdisipliner er inkludert. Oversikten danner grunnlaget for den foreslåtte metodikken beskrevet i kapittel 3.

2.2 Helhetlig risiko- og sårbarhetsanalyse (ROS)

Sivilbeskyttelsesloven pålegger norske kommuner å gjennomføre en helhetlig risiko- og sårbarhetsanalyse (ROS). Analysen skal kartlegge, systematisere, og vurdere sannsynligheten for uønskede hendelser som kan inntreffe i kommunen og hvordan disse kan påvirke kommunen. Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap definerer i sin *Veileder til helhetlig risiko- og sårbarhetsanalyse i kommunen* (DSB, 2014) ulike konsekvenstyper man ønsker å vurdere (Tabell 1).

Tabell 1. Samfunnsverdier og konsekvenstyper for befolkningens sikkerhet og trygghet (DSB, 2014).

Samfunnsverdi	Konsekvenstype
Liv og helse	– Dødsfall – Skader og sykdom
Stabilitet	– Manglende dekning av grunnleggende behov – Forstyrrelser i dagliglivet
Natur og miljø	– Langtidsskader på naturmiljø – Langtidsskader på kulturmiljø/-minner
Materielle verdier	– Økonomiske tap

Videre kan det også defineres alvorlighetsklasser for de ulike konsekvenstypene og kriterier for inndeling i sannsynlighetsklasser. Eksempler på dette er gitt i Tabell 2 og Tabell 3 (DSB, 2014). Om det ikke finnes eksterne risikoakseptkriterier kan det defineres risikokriterier i dette steget.

Tabell 2. Eksempel på sannsynlighets kategorier som benyttes av direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB, 2014).

Kategori	Tidsintervall	Sannsynlighet (år ⁻¹)	Forklaring
E	Oftere enn 1 gang i løpet av 10 år	>10 %	Svært høy
D	1 gang i løpet av 10 til 50 år	2–10 %	Høy
C	1 gang i løpet av 50 til 100 år	1–2 %	Middels
B	1 gang i løpet av 100 til 1000 år	0,1–1 %	Lav
A	Sjeldnere enn 1 gang i løpet av 1 000 år	< 0,1 %	Svært lav

Tabell 3. Eksempel på inndeling i konsekvenskategorier for konsekvenstype "stabilitet", som omfatter tap av kritisk infrastruktur (DSB, 2014).

Varighet	Antall berørte personer			
	< 50	50–200	200–1000	>1000
> 7 dager	kategori 3	kategori 4	kategori 5	kategori 5
2–7 dager	kategori 2	kategori 3	kategori 4	kategori 5
1–2 dager	kategori 1	kategori 2	kategori 3	kategori 4
< 1 dag	kategori 1	kategori 1	kategori 2	kategori 3

Dette former basis for en risikomatrix av sannsynlighet og konsekvens for hver av samfunnsverdiene fra Tabell 1 (Figur 2)

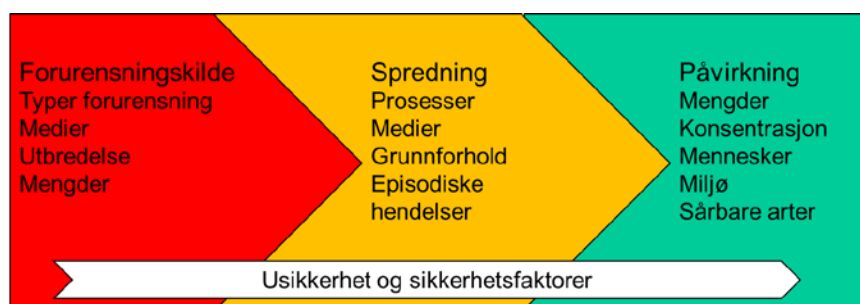
Negativ konsekvens – risiko Positiv konsekvens - mulighet	5	Medium	Høy	Høy	Høy	Høy
	4	Lav	Middels	Høy	Høy	Høy
	3	Lav	Middels	Middels	Høy	Høy
	2	Lav	Lav	Middels	Middels	Høy
	1	Lav	Lav	Lav	Lav	Middels
		1	2	3	4	5
		Sannsynlighet				

Figur 2. Eksempel på risikomatrix, som deler risikoen inn i tre nivåer: Lav, Middels og Høy.

2.3 Miljøkjemisk risikovurdering

2.3.1 Prinsipp

Nåværende praksis i miljørisikovurdering er basert på en deterministisk tilnærming, der data som beskriver kilden til forurensningen, spredningsveier og målgrupper som påvirkes (mennesker eller miljøet) anvendes (NGI, 2020a). Hovedprinsippet er at dersom det er mulig at eksponering kan finne sted, så vil det finne sted. Det betyr at sannsynligheten for hendelsen ikke tas med i betraktning.



Figur 3. Risikovurderingskjeden og sentrale tema som skal besvares ved vurdering av et område med forurenset grunn (NGI, 2020a).

2.3.2 Fremgangsmåte

Miljørisikovurderingen ser i prinsipp bare på konsekvensen for mennesker eller miljøet som følge av eksponering til kjemiske forbindelser via identifiserte spredningsveier. Det inkluderes ingen informasjon om sannsynligheten for forskjellige forurensnings-scenarier eller spredningsveier. Tradisjonelt gjøres det deterministiske vurderinger, med faste verdier og konstanter, der man vurderer eksponeringsveier med hensyn til eksponeringsmengde og eksponeringstid avhengig av type arealbruk. Dette har dannet grunnlaget for utarbeidelse av tilstandsklasser med faste verdier (SFT, 2009). Ved manglende eller usikre inngangsdata brukes en worst-case tilnærming, der det tas høyde for maksimal eksponering.

2.3.3 Akseptkriterier

Akseptkriteriet for menneskelige helse i en miljørisikovurdering er definert som "maximum tolerable daily intake" (MTDI) den maksimale dose et menneske kan bli utsatt for uten av en forventer helsemessige konsekvenser (NGI, 2020b). Enheten for MTDI er 'mg av den kjemiske forbindelsen pr. kg kroppsvekt pr. dag'. For kreftfremkallende stoffer vurderer man livstids-integrert eksponering. Der det ikke finnes en sikker grense der en kan utelukke helsemessige effekter ved kreftfremkallende stoffer setter man akseptkriteriet for kreftrisiko til eksponering som har en livstidsdødelighet lavere enn 10^{-5} , ved en antatt livslengde på 70 år. Siden toksisitetsdata som brukes ofte er basert på dyreforsøk bruker man "assessment factors" (AF) for å

utlede akseptkriterier for mennesker. Avhengig av datamengde som er tilgjengelig vil AF ofte varierer mellom 100–1000.

For å vurdere akseptkriteriet for økologisk risiko ønsker man å bestemme "*predicted no effect concentration*" (PNEC). Siden det finnes mange plante- og dyrearter som lever i grunnen, og har ulik følsomhet for de ulike miljøgifter, er det vanskelig å finne en verdi som beskytter alle arter (SFT, 1999). Dersom man har "*no observed effect concentrations*" (NOEC) for mange ulike arter setter man akseptkriteriet til å beskytte 95% av artene. Dette uttrykkes som "*hazard concentration 5%*" (HC₅) som er ekvivalent med PNEC. For å uttrykke akseptkriteriet for alvorlig risiko beregnes ofte også "*hazard concentration 50%*" (HC₅₀), der halvparten av de undersøkte arter kan bli utsatt for toksiske effekter. Dersom det foreligger begrenset mengde data av få organismer anvender man "*assessment factors*" (AF) for å utlede PNEC fra den laveste NOEC som er rapportert i litteraturen. AF kan variere fra 50–1000 avhengig av toksisitetsdata som finnes.

Bruk av *assessment factors* kan føre til svært konservative resultater av en miljørisikovurdering. Probabilistiske definerte verdier og vurderinger kan gjøre det mulig å håndtere usikkerheter på en bedre måte. Det foregår studier som vurderer mulighetene til å ta inn probabilistiske vurderinger i en miljørisikovurdering, men det foreligger ingen internasjonal praksis slik det gjør for vurdering av for eksempel geofarer (NGI, 2019).

2.3.4 Avfallsforskriften

Avfallsforskriften (FOR 2004-06-01 nr. 930: Forskrift om gjenvinning og behandling av avfall, Klima- og miljødepartement, 2004) definerer i kapittel 9 krav til karakterisering og klassifisering av avfall. Basert på disse kriteriene vurderes om avfallet kan deponeres på et deponi for:

- ↗ inert avfall
- ↗ ordinært avfall
- ↗ farlig avfall

Det gjelder egne kriterier for ordinært avfall og farlig avfall som deponeres sammen på et deponi for ordinært avfall.

Hver deponitype har egne krav til utforming av barriere som skal hindre spredning av miljøgifter i avfallet. Krav til bunn- og sidetettingen medfører at barrieren i de fleste tilfeller skal bestå i "dobbel bunntetting", en kombinasjon av en geologisk barriere og en kunstig tetningsmembran. Unntaket gjelder for deponier for inert avfall, der kun krav til en geologisk barriere gjelder. Det kan også gjøres et unntak fra kravet om dobbel bunntetting basert på en risikovurdering (SFT, 2005). Naturlige geologiske barrierer kan suppleres med konstruerte geologiske barrierer. Sammen skal de oppfylle kravene som vist i Tabell 4.

Tabell 4. Krav til bunn og sidetetting av deponier for ulike kategorier avfall (Miljødirektoratet, 2004).

Parameter	Kategori 1. Førlig avfall	Kategori 2. Ordinært avfall	Kategori 3. Inert avfall
Permeabilitet (k, m/s)	$\leq 1 \times 10^{-9}$	$\leq 1 \times 10^{-9}$	$\leq 1 \times 10^{-7}$
Lagtykkelse (m)	≥ 5	≥ 1	≥ 1

Veileder om miljørisikovurdering av bunntetting og oppsamling av sigevann ved deponier (SFT, 2003) beskriver en 3 trinns fremgangsmåte for risikovurderingen:

- ↗ Trinn 1: kildekarakterisering
- ↗ Trinn2: Transportkarakterisering
- ↗ Trinn 3: Resipientkarakterisering

2.4 Risikovurdering av geofarer

Geofarer har vanligvis fokus på skred, flom eller jordskjelv. Forskrift om tekniske krav til byggverk (TEK 17; DiBK, 2017) trekker opp grensen for et minimum av egenskaper et byggverk må ha for å kunne oppføres lovlig i Norge. Kapittel 7 i forskriften omfatter krav om sikkerhet mot naturpåkjenninger, herunder sikkerhet mot flom, stormflo og skred. Reglene angir hvilke sikkerhetsnivå som skal legges til grunn ved regulering og bygging i fareområder som også omfatter etablering av deponier.

Det er gitt et generelt krav om at byggverk skal utformes og lokaliseres slik at det er tilfredsstillende sikkerhet mot fremtidige naturfarer. Sikkerhetskravene er formulert i form av krav til nominell årlig sannsynlighet for ulike sikkerhetsklasser. I det følgende beskrives akseptkriteriene for ulike ytre påkjenninger.

2.4.1 Skred

For byggverk i skredfareområde skal sikkerhetsklasse for skred fastsettes. Det finnes tre sikkerhetsklasser for skred som er differensiert etter konsekvens for liv og helse, samt økonomiske eller andre samfunnsmessige konsekvenser. Konsekvensene kategoriseres som "liten", "middels" og "stor" med korresponderende sikkerhetsklasse S1, S2 og S3 beskrevet nedenfor. Byggverk og tilhørende uteareal skal plasseres, dimensjoneres eller sikres mot skred, herunder sekundærvirkninger av skred, slik at største nominelle årlige sannsynlighet i Tabell 5 ikke overskrides. Byggverk hvor konsekvensen av et skred, herunder sekundærvirkninger av skred, er særlig stor, skal ikke plasseres i skredfarlig område.

Tabell 5. Sikkerhetsklasser og største nominell sannsynlighet for byggverk i skredfareområde (TEK 17; DiBK, 2017).

Sikkerhetsklasse for skred	Konsekvens	Største nominelle årlige sannsynlighet
S1	liten	1/100
S2	middels	1/1000
S3	stor	1/5000

Kravene til sikkerhet i Tabell 5 gjelder også for kvikkleireskred, men i praksis vil det være umulig å angi sannsynlighet for kvikkleireskred. Sikkerhetsnivå for en faresone for kvikkleireskred fastsettes derfor isteden ved en sikkerhetsfaktor, F. Sikkerhetsfaktoren angir forholdet mellom stabiliserende krefter og drivende krefter for den skråningen som har lavest stabilitet i faresonen.

Sikkerhetsklassene S1, S2 og S3 er definert som følger:

- Sikkerhetsklasse S1 omfatter tiltak der et skred vil ha liten konsekvens. Dette kan eksempelvis være byggverk der det normalt ikke oppholder seg personer og der det er små økonomiske eller andre samfunnsmessige konsekvenser. Eksempler på byggverk som kan inngå i denne sikkerhetsklassen er garasjer, uthus, båtnaust, lager med lite personopphold og mindre brygger for sport og fritid.
- Sikkerhetsklasse S2 omfatter tiltak der et skred vil føre til middels konsekvenser. Sikkerhetsklasse S2 kan for eksempel være byggverk der det normalt oppholder seg maksimum 25 personer, eller der det er middels økonomiske eller andre samfunnsmessige konsekvenser.
- Sikkerhetsklasse S3 omfatter tiltak der konsekvensen av en skredhendelse er stor. Sikkerhetsklasse S3 omfatter for eksempel byggverk der det normalt oppholder seg mer enn 25 personer, eller der det er store økonomiske eller andre samfunnsmessige konsekvenser.

2.4.2 Flom

TEK 17 har tre sikkerhetsklasser innen flom (Tabell 6). Denne er basert på konsekvens og ulike bygningstyper som plasseres i de tre sikkerhetsklassene etter personopphold, økonomiske konsekvenser og byggverkets eventuelle betydning for beredskap og krisehåndtering nasjonalt eller regionalt.

Tabell 6. TEK 17 sikkerhetsklasser og største tillatte nominelle årlige sannsynlighet for plassering byggverk i flomutsatt område (TEK 17; DiBK, 2017).

Sikkerhetsklasse flom	Konsekvens	Største nominelle årlige sannsynlighet
F1	Liten	1/20
F2	Middels	1/200
F3	Stor	1/1000

Sikkerhetsklassene F1, F2 og F3 er definert som følger:

- ↗ Sikkerhetsklasse F1 omfatter byggverk med lite personopphold og små økonomiske eller andre samfunnsmessige konsekvenser, f.eks. garasje eller lagerbygning med lite personopphold
- ↗ Sikkerhetsklasse F2 omfatter de fleste byggverk beregnet for personopphold. De økonomiske konsekvensene ved skader på byggverket kan være store, men kritiske samfunnsfunksjoner settes ikke ut av spill. I flomutsatte områder der det under flom vil være stor dybde eller sterk strøm, bør det være samme sikkerhetsnivå som sikkerhetsklasse F3. Byggverk som kan inngå i F2 er:
 - Bolig, fritidsbolig og campinghytte
 - Garasjeanlegg og brakkerigg
 - Skole og barnehage
 - Kontorbygning
 - Industribygg
 - Driftsbygning i landbruket som ikke inngår i sikkerhetsklasse F1
- ↗ Sikkerhetsklasse F3 omfatter byggverk for sårbare samfunnsfunksjoner og byggverk der oversvømmelse kan gi stor forurensning på omgivelsene. Byggverk som kan inngå i denne sikkerhetsklassen er:
 - Byggverk for særlig sårbare grupper av befolkningen, for eksempel sykehjem og lignende.
 - Byggverk som skal fungere i lokale beredskapssituasjoner, for eksempel sykehus, brannstasjon, politistasjon, sivilforsvarsanlegg og infrastruktur av stor samfunnsmessig betydning. For byggverk som har regional eller nasjonal betydning i beredskapssituasjoner gjelder første ledd.
 - Avfallsdeponier der oversvømmelse kan gi forurensningsfare. For deponier som omfattes av storulykkeforskriften gjelder første ledd.
 - Byggverk hvor konsekvensen av en flom er særlig stor, skal ikke plasseres i flomutsatt område. (§ 7-2, første ledd)

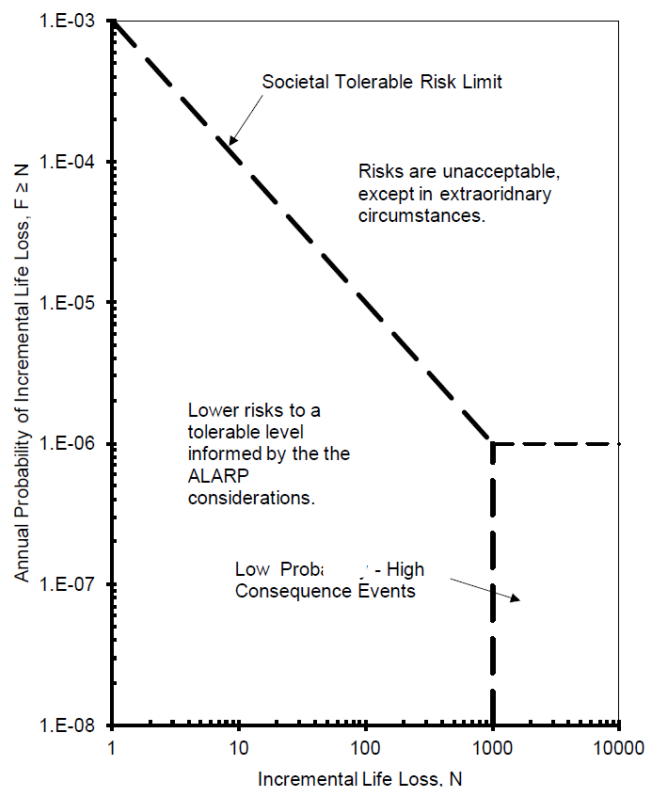
Tabell 6 gjelder sikkerhet mot saktevoksende flommer som normalt ikke medfører fare for menneskeliv. I tilfeller hvor flomfaren kan føre til tap av liv skal tiltaket plasseres i sikkerhetsklassene for skred, som vist i Tabell 5.

2.5 Akseptkriterier for dammer

Flere land stiller krav til eller har retningslinjer for sikkerhet for mennesker som potensielt kan bli berørt av et dambrudd, i form av eksplisitte og tallfestede risikoakseptkriterier. For risiko som uttrykker menneskelige tap, skilles det mellom 'individuell risiko' og 'samfunnsmessig risiko':

Med 'individuell risiko' menes sannsynligheten for at et individ mister livet som følge av faren i løpet av en referanseperiode (vanligvis ett år). Den individuelle risikoen innebærer altså en risikoøkning som kommer i tillegg til den underliggende sannsynligheten for å miste livet, dersom faren ikke eksisterte. Grensen for individuell risiko formuleres som en årlig sannsynlighet. I Norge finnes det ikke slike grenser, men $10^{-4}/\text{år}$ er en mye brukt øvre grense for akseptabel risiko i utlandet og i offshore industrien (f.eks. USACE, 2014).

Risiko for flere dødsfall under én og samme hendelse refereres til som 'samfunnsmessig risiko'. Samfunnsmessig risiko defineres som risikoen for en omfattende eller storskala skade fra en hendelse, der konsekvensene er i en slik målestokk at det fremkaller et sosialt/politisk ansvar og flere personer kan miste livet. I dette perspektivet inkluderes hendelser med lav sannsynlighet og store konsekvenser. I Figur 4 angis sannsynligheten på $10^{-5}/\text{år}$ å være øvre grense for tolerabel risiko for 100 dødsfall og $10^{-6}/\text{år}$ for 1000 dødsfall.



Figur 4. Anbefalte risikoakseptkriterier for samfunnsmessig risiko for dammer i USA; ALARP = "As low as reasonably practicable" (USACE, 2014).

3 Forslag til en integrert risikovurdering for deponier

3.1 Trinnvis fremgangsmåte

Ved lokalisering av fremtidige nye massedeponier på Svalbard bør følgende faglige aspekter vurderes (NGI, 2018a):

- ↗ Fremtidig klima
- ↗ Permafrost
- ↗ Skred (snø, sørpe, stein).
- ↗ Geoteknisk stabilitet av grunnen
- ↗ Hydrogeologiske forhold
- ↗ Avfallskarakterisering/avfallsforståelse.

Slik det fremgår av foregående kapittel har hver faglig disiplin sin egen måte å vurdere risiko på. Anvendelse av disse ulike systemer til å vurdere risikoen ved lokalisering av et deponi vil kreve en omfattende datamengde. I tillegg vil integrering av de ulike delaspekter i en helhetlig betraktning av samlet risiko skape problemer.

I det følgende foreslås en kvalitativ risikovurdering der de ulike risikomomenter klassifiseres. De prosessene som ansees å utgjøre den største samlede risiko, eller hvor risikoen ansees for å være uakseptabel, vil da være gjenstand for en nærmere kvantitativ risikovurdering med verktøy som egner seg for den spesifikke fagdisiplinen. Metodikken bygger på metodikken utviklet i NGIs forskningsprosjekt BegrensSkade (Vangelsten m.fl., 2015; Piciullo m.fl., 2020).

3.2 Kvalitativ risikovurdering

Den kvalitative risikovurdering er bygget opp etter prinsippene i NS-ISO 31000: 2018.

- ↗ Risikoidentifikasjon: Hva kan gå galt?
- ↗ Risikoanalyse: Hva er sannsynligheten for at det går galt? Hva er konsekvensen av at det går galt?
- ↗ Risikoevaluering: Er risikoen akseptabel?

3.2.1 Risikoidentifikasjon

Risikoidentifikasjonen vurderer alle mulige uønskede hendelser som vil kunne påvirke funksjonaliteten til et fremtidig deponi. I prinsipp skal en slik identifikasjon være stedsspesifikk, men en generalisert oversikt over de mest vesentlige uønskede hendelser vises i Tabell 7. Verktøyet som presenteres her har fokus på deponiets livsfase som omfatter drift, avslutning og etterdrift. Risiko ved prosjektering og etablering av deponiet er ikke omfattet av verktøyet i dagens form. Dette kan imidlertid inkluderes ved videre utvikling av verktøyet.

Tabell 7. Sammenstilling av de viktigste uønskede hendelser ved et fremtidig deponi.

Prosess	Uønsket hendelser
Klima (K)	K1 Økt nedbør, kraftigere overflateavrenning og mulig skade på tildekkingen og avfallsspredning
	K2 Økte snømengder vil gi større vårmelting og overflateavrenning som fører til mulig skade på tildekkingen og avfallsspredning
	K3 Ekstrem nedbør vil gi erosjon og nye dreneringsløp med mulig spredning av sigevann
Permafrost (P)	P1 Endret temperatur regime, påvirker barrierer og stabilitet
	P2 Dypere aktivt lag, nye dreneringsløp gjennom og under deponiet
	P3 Vanngjennomstrømning gjennom bunn av deponi, hvis permafrost som barriere forsvinner
Skred (S)	S1 Skredhendelse som rammer personer i jobb på deponiet
	S2 Skredhendelse som fører til transport av avfall ut av deponiet i drift
	S3 Skredhendelse som skader forseglet avsluttet deponi
Geoteknisk stabilitet (G)	G1 Skjærfasthet overvurderes, instabilitet og utrasing av masser
	G2 Oppfylling høyere enn prosjektert som kan føre til utrasing
	G3 Det oppstår poreovertrykk i grunnen som gjør deponiet ustabil
Hydro(geo)logi (H)	H1 Erosjon av deponimateriale som føres til resipient
	H2 Vanngjennomstrømning gjennom deponiet gir utlekking
	H3 Svikt i overvannshåndtering gir spredning til resipient
Avfallskarakterisering(A)	A1 Deponert avfall er ikke i henhold til tillatelse, eksempelvis farlig avfall deponeres på deponi for ordinært eller inert avfall.
	A2 Avfallets egenskaper endres over tid som medfører økt utlekking, gassdannelse og setningsskader.
	A3 Deponering av avfall med "ukjente" miljøgifter.

Klima på Svalbard er i endring. De siste årene har det vært en klar tendens til en økning i temperatur og nedbør i form av regn i vinterhalvåret. Nye klimasimuleringer indikerer at både årsnedbør og sesongnedbør beregnes å øke i fremtiden. Det er forventet at årsmiddeltemperaturene vil øke med rundt 7–10°C mot slutten av århundret (fra 1970–2000 til 2070–2100), med størst oppvarming om vinteren og minst om sommeren (Hanssen-Bauer m.fl., 2019). For hele Svalbard er årsnedbøren forventet å øke med 45% til 65% (Hanssen-Bauer m.fl., 2019), mens det for Longyearbyen-området er forventet en økning på 40% for "verst" utslippsscenario, og 30% og 20% for hhv. middels og lavt utslippsscenario (Statsbygg, 2018). Disse tall er trolig også representative for Barentsburg området. Mot slutten av århundret beregnes det også en markant økning i dager med kraftig nedbør, og nedbørmengden på dager med kraftig nedbør forventes å øke. For Longyearbyen-området beregnes det i vinterhalvåret opptil en tredobling i antall mildværsepisoder med nedbør i form av regn sammenlignet med dagens situasjon (Statsbygg, 2018).

Permafrost vil påvirkes av den forventede økningen i både temperatur og nedbørmengder. Dette vil påvirke permafrostens evner som naturlig geologisk barriere i et planlagt deponi. Det er vanskelig å se for seg at permafrost vil representere en 100% tett geologisk barriere i grunnen i et deponi. Størst reduksjon i permafrost og aktivt lag er forventet i og ved eksisterende elveleier og bekkefar.

Skred kan utløses av økt nedbør som regn og mer intense episoder. Basert på forelagte fremtidige klimascenarier forventes antall dager med snøfall å bli færre. Samtidig kan mengden snø som faller øke. Dette vil påvirke stabiliteten til massene i terrenget, med det resultat at skred vil forekomme hyppigere enn i dag (Hanssen-Bauer m.fl., 2019).

Geoteknisk stabilitet er relevant i forhold til mulig utrasing av deponerte masser. Utraste masser vil kunne spres utenfor deponilokaliteten og potensielt påvirke og belaste miljøet. Mindre ras har tidligere blitt observert i fyllingsfronten av eksisterende deponier som ser ut til å være forårsaket av at vann har kunne renne fritt over og gjennom et fyllingsområde. Geoteknisk stabilitet av deponier er stedsspesifikk, og avhengig av helning av terrenget, belastning på grunnen, samt grunnens skjærfasthet og poretrykksforhold. Temperaturøkning kan gi redusert skjærfasthet og økte poretrykk med redusert sikkerhet som resultat.

Hydrologi og hydrogeologi i et deponiområde er dominert av nedbør og smeltevann på toppdekke samt fra høyereliggende områder som drenerer mot deponiet. Mektigheten av det aktive laget påvirker drenasjemønsteret og vanntransporten. Ved utflating av terrenget vil en kunne forvente ansamling av vann i overflaten og påfølgende overflateavrenning. Mildvårsperioder på frossen undergrunn kan øke fare for overflate erosjon.

Avfallskarakterisering vil gi svar på avfallets sammensetning og egenskaper og hvilke miljøgifter vil kunne lekke ut. Ved deponering av sterkt reaktive masser kan en forvente sur og metallholdig avrenning, i tillegg til potensiell varmedannelse som kan medføre brannfare. Vanninntrenging i deponiet vil være den viktigste prosessen som kan føre til spredning av forurensningen.

3.2.2 Risikoanalyse

For å analysere risikoen av de uønskede hendelsene ved deponier som har blitt identifisert brukes sannsynlighetsklasser med utgangspunkt i metodikken til NS 5815 (2006) som er vist i Tabell 8. Usikkerhet har i dette studiet fokus på naturlaster. Konsekvensklassene begrenses til dette dokumentet til fare for liv og helse og påvirkning av natur og miljø (Tabell 9). Dette kan utvides med konsekvenser for samfunnsstabilitet og materielle verdier som vist i Tabell 1.

Tabell 8. Sannsynlighetsklasser for vurdering av hendelser ved deponier.

Klassifisering	Klasse	Beskrivelse	Sannsynlighet	Retur periode
Sannsynlighet	1	svært lite sannsynlig	<0,1% per år	>1000 år
	2	lite sannsynlig	0,1–1% per år	1000-100 år
	3	mulig	1–10% per år	100-10 år
	4	sannsynlig	10–30% per år	10-3 år
	5	meget sannsynlig	>30% per år	< 3 år

Tabell 9. Konsekvensklasser for liv og helse (Lh) samt natur og miljø (Nm) med fokus på vann som resipient.

Klassifisering	Klasse	Beskrivelse	Liv og helse	Natur og miljø*
Konsekvens	1	ufarlig	Lettere skade	Små miljøskader
	2	farlig	Flere lettere skader	Flere stoffer over AA-EQS
	3	kritisk	Alvorlig skade	Overskridelse av MAC-EQS
	4	meget kritisk	Kritisk skade	Akutt lokal forurensning
	5	katastrofal	Ett eller flere dødsfall	Akutt regional forurensning

*Vurderes i forhold til miljøkvalitetskriterier i vannforskriften

3.2.3 Risikoevaluering

Risikoanalysen sammenstilles i en risikomatrix som gjør det mulig å evaluere risikoen. Risikokriteriene kan uttrykkes med fargekode fra lav (grønn) til høy risiko (rødt) som vist i Figur 5. Matrisen kan utformes på ulikt vis basert på forventet risikomodell og vilje til å ta/ikke ta risiko. Det foreslås å anvende en 5 x 5 risikomatrix hvor sannsynlighet plottes mot konsekvens i henhold til Tabell 8. Hver uønsket hendelse i de ulike klassene vist i Tabell 7 plottes i matrisen.

Meget sannsynlig					
Sannsynlig					
Mulig					
Lite sannsynlig					
Svært lite sannsynlig					
	Ufarlig	Farlig	Kritisk	Meget kritisk	Katastrofalt

Figur 5. Risikomatrixen basert på 5 sannsynlighets- og konsekvensklasser.

Risikokriteriene i Figur 5 er definert som følger:

- ↗ Høy risiko ■ : Tiltak må iverksettes
- ↗ Middels til høy ■ : Behov for tiltak bør vurderes
- ↗ Middels risiko ■ : Nærmere analyse er nødvendig for å vurdere om tiltak er nødvendig
- ↗ Lav til middels ■ : Nærmere analyse vurderes
- ↗ Lav risiko ■ : Tiltak ikke nødvendig

3.3 Kvantitativ risikovurdering

For å kunne kvantifisere risikoen som ble identifisert i en kvalitativ risikovurdering trenges det en metode for å kunne gi et felles målbart uttrykk for de uønskede hendelsene som inngår i risikovurderingen:

- Klima
- Permafrost
- Skred
- Geoteknisk stabilitet
- Hydrogeologi
- Avfallskarakterisering

En monetær parameter anvendes ofte for å kunne summere sannsynligheten og konsekvensene av de ulike uønskede hendelsene. I bygg og anleggsbransjen vil en ofte velge å bruke kostnadene for å tilbakeføre til opprinnelig tilstand etter en uønsket hendelse. Men som det fremgår av de ulike kategorier som inngår i en risikovurdering for planlagte deponilokaliteter i arktiske strøk vil det være vanskelig å finne et monetært uttrykk for alle kategorier. Miljøaspekter og naturverdier har vist seg generelt vanskelig å sette en pris på. "*Willingness to pay*" for miljøkvalitet er en metode som anvendes av miljøøkonomer for å komme frem til et monetært uttrykk (Pearce m.fl. 2006). Foreløpig mangler grunnlaget for å kunne bruke tilsvarende metoder i den foreslåtte risikovurderingsmetode.

3.4 Usikkerheter

Bruken av en 5 x 5 risikomatrix til å vurdere sannsynlighet og konsekvenser av ulike uønskede hendelser på en kvalitativ måte medføre en betydelig usikkerhet. Vurdering av de ulike sannsynlighets- og konsekvensklasser vil ofte være avhengig av en ekspertvurdering. Dermed blir klassifiseringen av de ulike uønskede hendelser en subjektiv vurdering som ikke uten videre kan reproduseres. For å redusere usikkerheten er det tilrådelig å bruke et risikovurderingspanel der representanter fra ulike disipliner drøfter de ulike hendelser og vurderer sannsynlighet og konsekvenser. Dette vil også kunne danne grunnlaget for å angi et intervall for de ulike hendelsene som et uttrykk for usikkerheten som eksisterer.

4 Anvendelse av metodikken - Eksempel

4.1 Bakgrunn

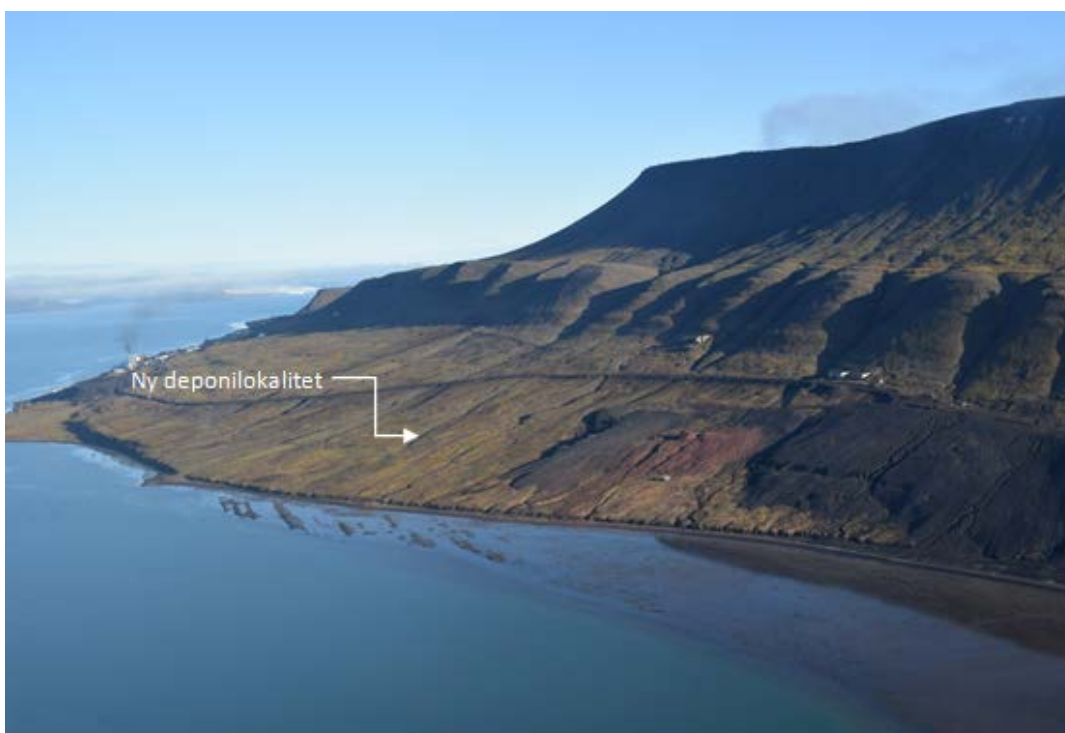
Et deponi for skeidestein, aske og slagg planlegges i Barentsburg. Et sammendrag av de lokale forhold er her presentert som grunnlag for anvendelse i risikovurderingen med metodikken presentert i denne rapporten. For mere utførlig informasjon henvises til NGI rapport 20180239-01-R (NGI, 2018b).

Trust Arktikugol ønsker å etablere et nytt deponi for skeidestein, aske og slagg fra sin gruvedrift i Barentsburg. Barentsburg er lokalisert på østsiden av Grønfjorden, en av flere mindre fjordarmer i den større Isfjorden på Svalbards vestkyst. I området til den omsøkte deponilokaliteten er berggrunnen av nedre Kritt alder. Bergartene tilhører Karoline-formasjonen og består av vekslende lag med skifre og sandstein. På den ønskede lokaliteten for det nye deponiet er det kun synlig berg nede langs strandkanten ved Grønfjorden (Figur 8). Ellers er hele terrenget fra Grønfjorden og opp til veien dekket av løsmasser. Disse løsmassene representerer ulike større og mindre forhistoriske flomskred som har løsnet i de høyereliggende områdene nordøst for deponilokaliteten.

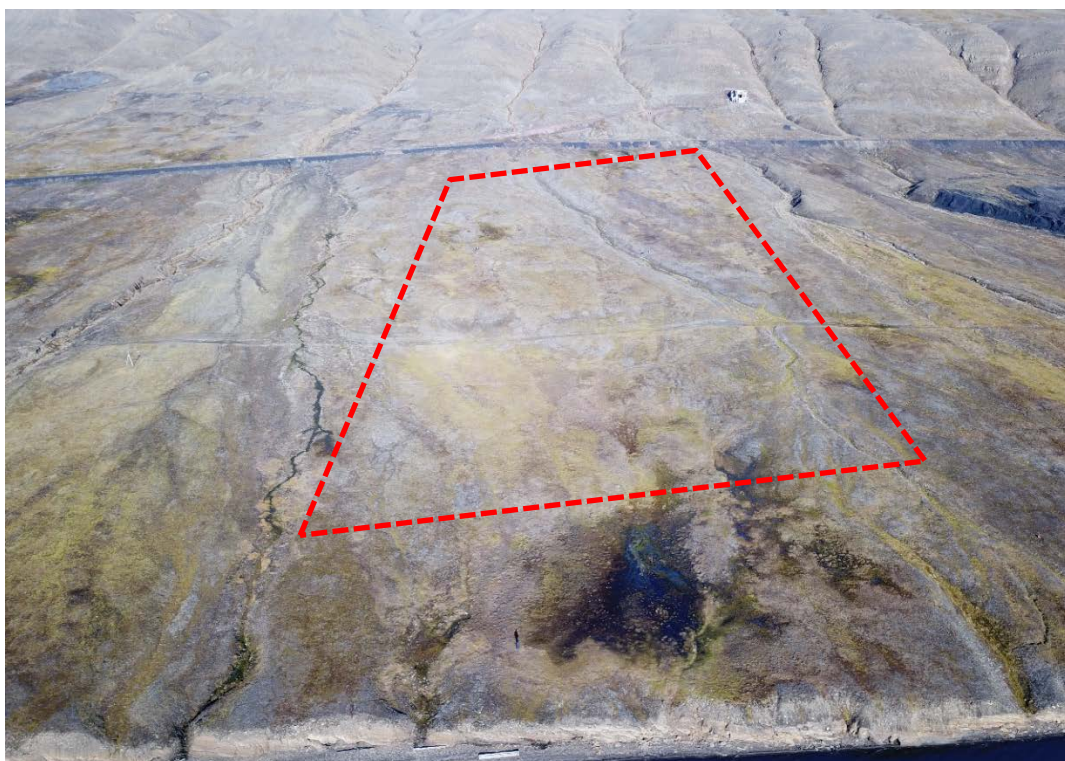
Ved etablering av deponiet er det ikke lagt opp til etablering av barrierer i bunnen eller sidene av selve deponiet. Deponiet er planlagt etablert direkte på den arktiske tundraen, og det eneste tiltaket er fjerning av de øverste 10–20 cm med jordmasser. Visuelt vil deponiet fremstå på samme måte som de eksisterende deponier for skeidestein, aske og slagg i Barentsburg og ellers på Svalbard. Foreslått lokalisering er vist i Figur 6 og bilder av området er vist i Figur 7 og Figur 8.



Figur 6. Oversiktskart som viser plassering av den omsøkte deponilokaliteten for nytt deponi for skeidestein, slagg og aske (rødt rektangel, eksisterende deponier sorte rektangler).



Figur 7. Oversiktsbilde av foreslått lokalitet for nytt deponi (NGI, 2018b).



Figur 8. Oversiktsbilde fra lokaliteten tatt med drone. Det mørke området i midten av nedre delen av bildet er dominert av relativt finkornede og fuktige masser med synlige palsa-strukturer, rødt rektangel viser ca. plassering av planlagt deponi (NGI, 2018b).

4.2 Vurdering av lokale forhold

4.2.1 Klima

Klimaet på Svalbard er preget av kalde vintre med temperaturer ned mot -30°C og kjølige somre med døgnmiddeltemperaturer sjeldent over $10\text{--}15^{\circ}\text{C}$ (eklima.no). De årlige temperatursvingningene er lavere enn ellers i arktiske områder, og klimaet betegnes derfor ofte som et høy-arktisk maritimt snøklime. Klimaet i Barentsburg er noe mildere og våtere enn i Longyearbyen-området, som er blant de tørreste områdene på Svalbard. Årsmiddeltemperaturen for Barentsburg for perioden 1971–2000 var $-5,5^{\circ}\text{C}$, vintertemperaturen og sommertemperaturen var hhv. $-12,7^{\circ}\text{C}$ og $+4,1^{\circ}\text{C}$ (Isaksen m.fl., 2016). Årsmiddeltemperaturen for perioden 2001–2015 har økt med $1,9^{\circ}\text{C}$ i forhold til perioden før (1971–2000) og økning for vintersesongen ligger på $3,8^{\circ}\text{C}$ (Isaksen m.fl., 2016). Observert midlere årsnedbør for Barentsburg er 525 mm for referanseperioden 1961–1990. De mest "pessimistiske" klimascenariene (RCP8.5) indikerer at man ved århundrets slutt kan risikere en nedbørsøkning på 40% og en middeltemperatur for vintermånedene (desember-februar) på ca. 0°C for Barentsburg. Et slikt scenario vil ikke bare redusere dybde av permafrosten, men vil også føre til en betydelig økning i mengden overflatevann både på, over og rundt deponilokaliteten (NGI, 2018b).

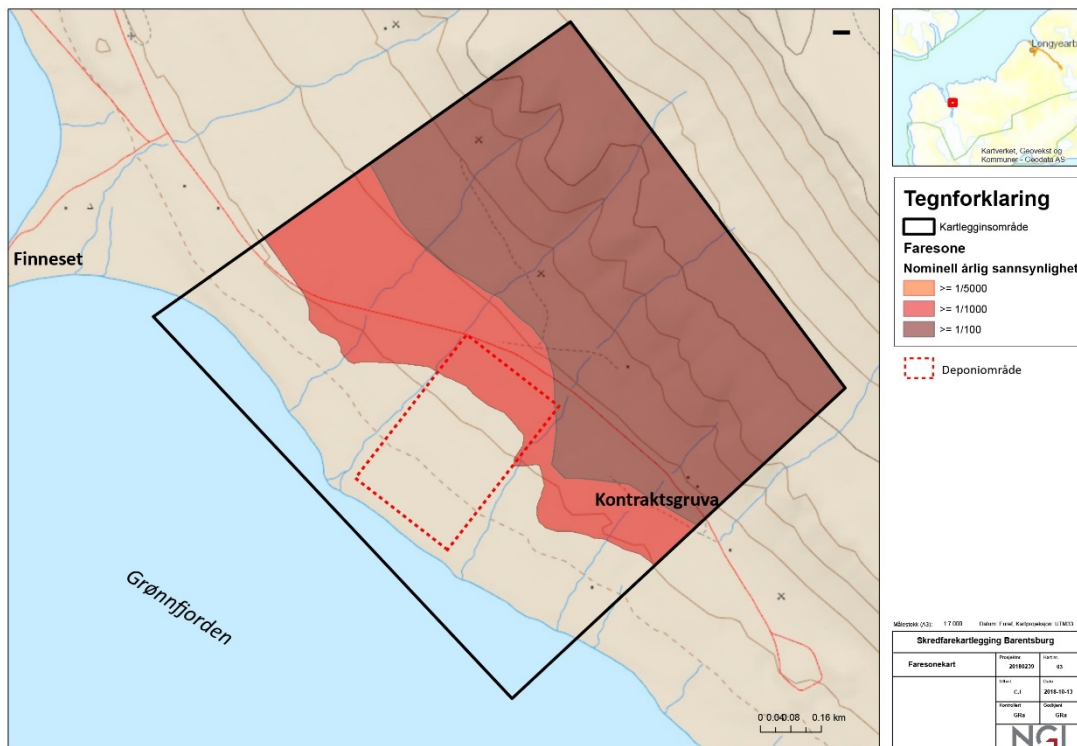
4.2.2 Permafrost

Svalbard har kontinuerlig permafrost med en tykkelse på mindre enn 100 m nær kysten, til over 450 meter i fjellområder og i større avstand fra kysten (Humlum m.fl., 2003). Ned til 15–20 meters dyp vil man registrere årlige svingninger, og i et stabilt klima vil de laveste temperaturene være på dette dypet. Nedenfor 15–20 meters dyp er bakketemperaturene beregnet å øke 2 til 3°C per 100 meter (pga. jordens geotermiske varmestrøm). Tykkelsen på det aktive laget er typisk 0,4 til 2 m (Isaksen m.fl., 2001). Tykkelsen påvirkes i stor grad av snødekket, da et tykkere snødekke forhindrer varmetap fra bakken om vinteren. Tykkelsen på det ufrosne laget er normalt større langs kysten på grunn av høyt saltinnhold i grunnen og dermed senket frysepunkt. Kystnære lokasjoner vil i tillegg være mer påvirket av reduksjon av havis på vinteren.

4.2.3 Skred

Terrenget over deponiområdet strekker seg opp fra ca. 100 moh. til toppen av Grønfjordfjellet på ca. 500 moh. Deler av terrenget er over 30 grader bratt og kan gi opphav til snøskred og delvis også steinsprang. Fjellsiden er delt opp av en markert terrasse fra ca. 225–270 med mulige utløsningsområder både over og under denne terrassen (Figur 9). Terrenget over deponiet legger til rette for snøskred, steinsprang, sørpe- og flomskred. Snøskred vil ha den største utbredelsen langs fjellsiden, mens sørpe- og flomskred vil ha de lengste utløpene i bekkeløpene.

I sum tilsier de klimatiske og geologiske forholdene at eventuelle hendelser ikke kan bli veldig store. Bare den øverste delen av det planlagte deponiet ligger i faresonen med en årlig sannsynlighet $\geq 1/1000$ og tilfredsstillende derfor ikke sikkerhetskravene til ny bebyggelse etter TEK 17 (NGI, 2018b).



Figur 9. Faresonekart over deponiet med nominell årlig sannsynlighet 1/100 og 1/1000. Nytt deponiområde er markert med det røde stiplede rektangelet (NGI, 2018b).

4.2.4 Geoteknisk stabilitet

Det omsøkte deponiet er planlagt etablert i et område med skråningshelning på mellom 8° til 10° . I nedre del av området ned mot fjorden er terrenget noe slakere ut mot strandlinjen. Det er utført stabilitetsberegninger for en 10 m høy oppfylling, basert på informasjon gitt i konsekvensutredningen for det nye deponiet. Resultatene fra beregningene viser at stabiliteten av deponiet er tilfredsstillende dersom fyllingsfronten etableres med en skråningshelning på ca. 14° (1:4) eller slakere. Til sammenligning er det for eksisterende deponi (som ligger like sørøst for ny lokalitet) tidligere fylt opp både høyere og brattere enn det som nå er planlagt for det nye deponiet. Grunnforholdene og terrenghelninger er tilnærmet likt og det er ikke funnet indikasjoner på bæreevnebrudd i undergrunnen på eksisterende deponi (NGI, 2018b). Konsekvensene av en eventuell utglidning av fyllingen vil være spredning av deponimasser til omgivelsene, i all hovedsak Grønnefjorden.

For å ivareta sikkerheten under utlegging i deponiet anbefales det å legge ut masser lagvis (lagtykkelse < 1 m). Det bør komprimeres mellom hvert lag. Videre er det fordelaktig å redusere tilsig av overvann og grunnvann inn i deponiet (avskjærende grøfter i overkant av deponiet), slik at stabiliteten i fyllingen ivaretas (NGI, 2018b).

4.2.5 Hydrologi og hydrogeologi

Avrenning fra et eventuelt nytt deponi vil skje til Grønfjorden, enten via grunnvann i det aktive laget eller direkte på overflaten. Grunnvannsprøver tatt i området for det planlagte deponiet viser naturlig forhøyede konsentrasjoner av mangan, sink og nikkel, uten at dette er påvist å påvirke Grønfjorden. Grønfjordens store vannvolum, samt store mengder vann fra elvesystem oppstrøms (Grøndalen, rett sør for deponilokaliteten) og tidevannseffekter gir høy vannutskiftning i det aktuelle området i Grønfjorden. En eventuell tilførsel av forurenset sigevann vil derfor få en rask fortynning av vannmasser som drenerer deponiet og omkringliggende områder (NGI, 2018b).

Mengden sigevann som oppstår i deponiet vil blant annet være avhengig av mengden nedbør i området, størrelsen på deponioverflaten, avfallets egenskaper (permeabilitet) samt deponiets form (avrenning på overflate eller infiltrasjon). Ideelt sett er nedslagsfeltet kun selve deponiarealet, men det kan komme fremmedvann (overvann, grunnvann) inn fra omkringliggende områder som følge av utilstrekkelig avskjæring. Det foregår en betydelig massetransport i de to avgrensede elveleiene under hovedperioden for snøsmelting i de høyereliggende områdene (i løpet av sommer månedene). Overflatevannet fra bakenforliggende terreng blir avskåret av grøften i overkant av vegen og det er således begrenset med overflatevann fra snøsmeltingen som vil påvirke deponiområdet. Ved manglende kontroll på overflatevann som drenerer ned mot deponilokaliteten vil man kunne få en mekanisk erosjon av deponerte masser. Dette kan føre til at relativt store mengder masser (spesielt fine fraksjoner) blir transportert raskt ut i Grønfjorden.

4.2.6 Avfallskarakterisering

Følgende avfallstyper og årlige gjennomsnittsmengder ønskes deponert på det nye deponiet (NGI, 2018b):

- ↗ 35 000 tonn skeidestein
- ↗ 20 000 tonn slag
- ↗ 180 tonn bygningsavfall
- ↗ 40 tonn matavfall
- ↗ 15 tonn glass, porselen og keramikk

Under oppredningen av kullet, skilles det ut stein/mineralske masser med lavere kullinnhold (såkalt skeidestein). Skeidestein kan inneholde biter av heng- og liggbergart (i all hovedsak sandstein), eller kan representere såkalt mellomstein, som er mindre rene lag internt i kullfløtsen. Kullet går til kullager, mens skeidestein deponeres. Eksisterende deponi for skeidestein fra gruva i Barentsburg er lokalisert langs nedsiden av veien ut

mot flyplassen og Heerodden. Skeidestein vil kunne inneholde varierende innhold av sulfidmineraler med potensiale for sur avrenning.

Ved forbrenning av kull i kraftverket i Barentsburg oppstår det restprodukter i form av aske (flyveaske) fra røykgassrensingen (går opp med røykgassen) og slagg fra forbrenningskjelen (mineralsk masse i kullet).

Bygningsavfall omfatter gips- og sementpuss, leire, sand, ren betong (PCB-fri), asbestholdige plater, stein og slaggull, samt andre bygningsmaterialer som ikke egner seg til gjenbruk/nyttiggjøring.

Matavfallet stammer fra husholdninger og industrivirksomhet i gruvebyen Barentsburg. Matavfallet forventes å være rent uten forhøyet innhold av metaller eller organiske miljøgifter. Sammenlignet med mengden skeidestein og aske/slagg vil denne fraksjonen være ubetydelig

Det foreligger ingen data på sigevannssammensetning for det framtidige deponiet. En meget konservativ tilnærming vil være å benytte resultater fra ristetestene som grunnlag for vurdering av avfallets forurensningspotensiale. Sammenlignet med målte konsentrasjoner i referansebekk og vann som pumpes opp i gruva, ligger de teoretisk beregnede konsentrasjonene i sigevannet fra framtidig deponi i samme størrelsesorden. Det er kun nikkell i forvitret skeidestein som kan gi en økt utlekking (NGI, 2018b).

4.3 Kvalitativ risikovurdering

Basert på den forenkla beskrivelse av deponilokaliteten er sannsynlighet og konsekvens av de uønskede hendelsene som definert i Tabell 7 vurdert av et risikovurderingspanel som var sammensatt av åtte forskere på NGI med ulik faglige kompetanse. Alle åtte forskere har god kjennskap til forholdene på Svalbard og deltatt i utarbeidelse av foreslått risikovurderingsmetodikk. Definisjon av uønskede hendelser og intern sammenheng mellom enkelte hendelser ble diskutert. Dette bør tilpasses stedsspesifikke forhold for nye deponilokaliteter for Longyearbyen som er under vurdering. Resultatet må derfor primært betraktes som et eksempel på anvendelse av verktøyet og ikke en definitiv risikovurdering av case studiet som ble anvendt i dette studiet.

Tabell 10. Vurdering av sannsynlighet og konsekvens av de viktigste uønskede hendelser (Tabell 7) ved etablering av et fremtidig deponi i Barentsburg (for forklaringen av sannsynlighets- og konsekvensklasser se Tabell 8 og Tabell 9, "-" betyr at dette er vurdert til å ikke være relevant for gjeldende hendelse).

Prosess	Uønsket hendelser	Sannsynlighet	Konsekvens	
			Liv og helse (Lh)	Natur og miljø (Nm)
Klima (K)	K1 Økt nedbør	4	-	2
	K2 Økt snømengde	4	-	2
	K3 Ekstrem nedbør	2	-	2
Permafrost (P)	P1 Temperaturregime	4	-	2
	P2 Dypere aktivt lag	1	-	1
	P3 Gjennomstrømning	3	-	2
Skred (S)	S1 Skred, Tap av liv	1	5	-
	S2 Transport av avfall	1	-	2
	S3 Toppdekke skade	1	-	3
Geoteknisk stabilitet (G)	G1 Skjærfasthet	2	2	3
	G2 Oppfyllingshøyde	4	2	3
	G3 Poreovertrykk	2	2	3
Hydrogeologi (H)	H1 Material til resipient	4	-	2
	H2 Vann inntrengning	5	-	2
	H3 Overvannssystem	5	-	2
Avfallskarakterisering (A)	A1 Avfallsklasse feil	3	2	2
	A2 Endring i avfall	4	-	2
	A3 Ukjente miljøgifter	2	-	2

Vurderingen av sannsynlighet og konsekvens av de uønskede hendelsene som presentert i Tabell 10 er sammenstilt i risikomatriksen vist i Figur 10. Dette gjelder totalt 22 risiki etter at de konsekvenser som ansees som ikke relevant er tatt bort. Dette gjelder spesielt konsekvenser for menneskenes liv og helse, der konsekvensene primært er relatert til skade som følge av skred og utrasning av massene. Totalt ble 14 konsekvenser vurdert til å ikke være relevant for klassifisering alternativt kunne de ha blitt klassifisert i den laveste kategorien (sannsynlighet 1 og konsekvens 1).

Meget sannsynlig		H2Nm, H3Nm			
Sannsynlig		K1Nm, K2Nm, P1Nm, G2Lh, H1Nm, A2Nm	G2Nm		
Mulig		P3Nm, A1Lh, A1Nm			
Lite sannsynlig		G1Lh, G3Lh, A3Nm, K3Nm	G1Nm, G3Nm		
Svært lite sannsynlig	P2Nm	S2Nm	S3Nm		S1Lh
	Ufarlig	Farlig	Kritisk	Meget kritisk	Katastrofalt

Figur 10. Risikomatriksen ved etablering av et fremtidig deponi i Barentsburg.

Risikomatriksen viser at de 18 vurderte uønskede hendelsene og 2 konsekvens kategorier kan klassifiseres som følger:

1. Ingen av hendelsene er vurdert til å *høy risiko*.
2. 3 hendelser er klassifisert som *middels til høy risiko*, der behov for tiltak bør vurderes ved fremtidig etablering av et deponi på området
3. 7 hendelser er klassifisert som *middels risiko*, der nærmere analyse er nødvendig for å vurdere om tiltak er nødvendig
4. 10 hendelser er klassifisert som lav til middels risiko, der behov for analyse bør vurderes
5. Bare 2 hendelser er klassifisert med lav risiko.

En oversikt er vist i Tabell 11. En aggregert risiko kan anvendes for å sammenligne ulike lokaliteter i forhold til hverandre. Samlet risiko kan vurderes basert på antall uønskede hendelser som faller i de ulike kategorier. Ved å gi høyrisiko 5 poeng og lav risiko 1 poeng, kan samlet risiko summeres. I det viste tilfelle i Figur 10 er samlet poengsum $12+21+20+2=55$. Den summen bør deles på antall hendelser/konsekvenser som ble vurdert i dette tilfelle 22. Dette gir en relativ poengsum på $55/22=2,5$ og kan dermed sammenlignes med andre deponiområder.

Tabell 11. Oppsummering av de viktigste uønskede hendelser ved etablering av et fremtidig deponi i Barentsburg i forhold til risikokriteriene.

Risikokriteriet	Beskrivelse	Uønsket hendelse
Høy risiko	Tiltak må iverksettes	ingen
Middels til høy	Behov for tiltak bør vurderes	G2Nm, H2Nm, H3Nm,
Middels risiko	Nærmere analyse er nødvendig for å vurdere om tiltak er nødvendig	K1Nm, K2Nm, P1Nm, S1Lh, G2Lh, H1Nm, A2Nm
Lav til middels	Nærmere analyse vurderes	K3Nm, P3Nm, S3Nm, G1Lh, G3Lh, G1Nm, G3Nm, A1Lh, A1Nm, A3Nm,
Lav risiko	Tiltak ikke nødvendig	P2Nm, S2Nm

5 Vurdering av metodikken

5.1 Forutsetninger

Før man starter risikovurderingen bør systemet avgrenses ved en *Definisjon av kontekst og omfang av analysen*. I foreliggende verktøy og eksempel fra Barentsburg har risikovurdering av eksisterende eller fremtidige deponier stått sentralt. Omfanget har blitt avgrenset til å fokusere på deponiets livsfase som omfatter drift, avslutning og etterdrift. Risiko ved prosjektering og etablering av deponiet er ikke omfattet av verktøyet som presenteres her.

Et standard sett på 18 uønskede hendelser er presentert. Dette gjør det lettere å sammenligne ulike områder i forhold til hverandre. Man må imidlertid være oppmerksom på stedsspesifikke forhold som kan gjøre det nødvendig å inkludere ytterligere uønskede hendelser.

De uønskede hendelser er bare vurdert i forhold til konsekvenser for menneskenes liv og helse og natur og miljø. Dette er mulig å utvide med konsekvensene for stabiliteten av samfunnet og økonomiske konsekvenser slik DSB har definert det (Tabell 1).

5.2 Fordeler og ulemper

Metodikken presentert i denne rapporten gjør det mulig å integrere risikovurdering av seks ulike tema/fagfelt som har hver sin etablerte metodikk for å vurdere risiko. Dette gir muligheten til å få en helhetlig oversikt i en kompakt og visuell form som gjør det lett å identifisere behov for tiltak og nærmere utredning.

Ulempen med metoden at den pga av ulikheter innenfor ulike tema ikke er mulig å gjøre den kvantitativ uten en videreutvikling til en felles risikoenhet. En monetær parameter anvendes ofte for å kunne summere sannsynligheten og konsekvensene av ulike uønskede hendelser. I bygg og anleggsbransjen vil en ofte velge å bruke kostnadene for å tilbakeføre til opprinnelig tilstand etter en uønsket hendelse. Dette skaper imidlertid utfordringer når det kommer til å verdsette natur i form av biodiversitet og miljøkvalitet. Dette er spesielt kritisk i et sårbart Arktisk miljø som allerede blir utsatt for betydelig trykk og belastning som følge av klimatiske endringer.

6 Referanser

- DiBK (2017). Veiledning om tekniske krav til Byggverk. Veiledning til kapittel 7. Sikkerhet mot naturpåkjenninger. Direktoratet for byggkvalitet, 2017.
- DSB (2014). Veileder til helhetlig risiko- og sårbarhetsanalyse i kommunen. DSB tema, ISBN: 978-82-7768-344-7, oktober 2014.
- Humlum, O., Instanes, A., Sollid, J.L. (2003). Permafrost in Svalbard: a review of research history, climatic background and engineering challenges, *Polar Research*, 22:2, 191-215, DOI: 10.3402/polar.v22i2.6455
- Hanssen-Bauer, I., Førland, E. J., Hisdal, H., Mayer, S., Sandø, A.B., Sorteberg, A. (eds.) (2019). *Climate in Svalbard 2100 - a knowledge base for climate adaptation*. NCCS report 1/2019.
- Isaksen, K., Holmlund, P., Sollid, J.L., Harris, C. (2001). Three deep alpine-permafrost boreholes in Svalbard and Scandinavia. *Permafrost Periglacial Process*. 12, 13–25.
- Isaksen, K., Nordli, Ø., Førland, E.J., Łupikasza, E., Eastwood, S., Niedźwiedz, T. (2016). Recent warming on Spitsbergen-Influence of atmospheric circulation and sea ice cover, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(20), 11,913-11,931, doi:10.1002/2016JD025606.
- Klima- og miljødepartementet (2004). Forskrift om gjenvinning og behandling av avfall (avfallsforskriften), sist rettet 14.10.2020.
<https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2004-06-01-930>
- Miljødirektoratet (2015). Risikovurdering av forurenset sediment. M-409/2015
- NGI (2018a). Vurdering av permafrost som geologisk barriere knyttet til deponietablering på Svalbard; delrapport 1 – Feltundersøkelser og klimavurderinger. Rapport nr. 20180397-01-R, desember 2018.
- NGI (2018b). Miljøriskovurdering av bruk av permafrost som naturlig geologisk barriere i deponi for slagg, aske og skeidestein, Barentsburg, Svalbard. Rapport nr. 20180239-01-R, oktober 2018.
- NGI (2019). Integrated multidisciplinary risk evaluation. Rapport nr. 20190132-01-R
- NGI (2020a). Spredningsveileder for forurenset grunn forslag til ny spredningsmodell – grunnlagsrapport til miljødirektoratet. Rapport nr. 20170577-01-R rev 1.
- NGI (2020b). Utvikling av nytt verktøy for risikovurdering av human helse på forurenset grunn i Norge. Rapport 20180840-01-R
- NS 5815:2006. Risikovurdering av anleggsarbeid, Norsk standard, Utgave 1, 2006-06-01.
- NS-IEC 31010:2019. Risikostyring - Metoder for risikovurdering.
<https://www.standard.no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1111200>

NS-ISO 31000:2018. Risikostyring – Retningslinjer.

<https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1002500>

Pearce, D., Atkinson, G., & Mourato, S. (2006). Cost-benefit analysis and the environment: recent developments. Organisation for Economic Co-operation and development.

Piciullo, L., Bekele, Y., Depina, I., Nadim, F., Langford, J. (2020). A management tool to reduce the risk of damage caused by geotechnical groundworks. Nordic Geotechnical Meeting, Helsinki.

SFT (1999). Risikovurdering av forurenset grunn. Veileder 99:01. TA-1629/99

SFT (2003). Veileder om miljørisikovurdering av bunntetting og oppsamling av sigevann ved deponier. TA-1995/2003

SFT (2005). Veileder om bunn- og sidetetting av deponier. TA-2095/2005

SFT (2009). Helsebaserte tilstandsklasser for forurenset grunn, Veileder TA-2553/2009.

Statsbygg (2018). Forventede klimaendringers langsiktige konsekvenser for bygging og forvaltning på Svalbard – Samlerapport. Rapport nr. IAS2171-3.

TEK 17 Forskrift om tekniske krav til byggverk (Byggteknisk forskrift), tilgjengelig på <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2017-06-19-840>

USACE (2014). Engineering and Design. Safety of dams – policy and procedures, Department of the Army. Engineering Report ER 1110-2-1156. US Army Corps of Engineers. Washington, DC. 31 March 2014.

Vangelsten, B.V., Haugen, T., Kalsnes, B. (2015). Begrensning av skader som følge av grunnarbeider, delprosjekt nr.: 5, Verktøy for risikovurdering, NGI, 2015-03-31

Dokumentinformasjon/Document information		
Dokumenttittel/Document title Permafrost som geologisk barriere på Svalbard - Metoder, verktøy og arbeidsflyt for risikovurdering av planlagte deponilokaliteter på Svalbard		Dokumentnr./Document no. 20180397-02-R
Dokumenttype/Type of document Rapport / Report	Oppdragsgiver/Client Svalbard Miljøvernfond	Dato/Date 2021-02-22
Rettigheter til dokumentet iht kontrakt/ Proprietary rights to the document according to contract NGI		Rev.nr.&dato/Rev.no.&date 0 /
Distribusjon/Distribution ÅPEN: Skal tilgjengeliggjøres i åpent arkiv (BRAGE) / OPEN: To be published in open archives (BRAGE)		
Emneord/Keywords Svalbard, deponi, risikovurdering, permafrost		

Stedfesting/Geographical information	
Land, fylke/Country Norge, Svalbard	Havområde/Offshore area
Kommune/Municipality Svalbard	Felt navn/Field name
Sted/Location	Sted/Location
Kartblad/Map	Felt, blokknr./Field, Block No.
UTM-koordinater/UTM-coordinates Sone: Øst: Nord:	Koordinater/Coordinates Projeksjon, datum: Øst: Nord:

Dokumentkontroll/Document control					
Kvalitetssikring i henhold til/Quality assurance according to NS-EN ISO9001					
Rev/Rev.	Revisjonsgrunnlag/Reason for revision	Egenkontroll av/ Self review by:	Sidemanns-kontroll av/ Colleague review by:	Uavhengig kontroll av/ Independent review by:	Tverrfaglig kontroll av/ Inter-disciplinary review by:
0	Originaldokument	2020-12-17 Gijs Breedveld	2020-12-18 Gudny Okkenhaug		

Dokument godkjent for utsendelse/ Document approved for release	Dato/Date 22. februar 2021	Prosjektleder/Project Manager Gijs Breedveld
--	--------------------------------------	--

NGI (Norges Geotekniske Institutt) er et internasjonalt ledende senter for forskning og rådgivning innen ingeniørrelaterte geofag. Vi tilbyr ekspertise om jord, berg og snø og deres påvirkning på miljøet, konstruksjoner og anlegg, og hvordan jord og berg kan benyttes som byggegrunn og byggemateriale.

Vi arbeider i følgende markeder: Offshore energi – Bygg, anlegg og samferdsel – Naturfare – Miljøteknologi.

NGI er en privat næringsdrivende stiftelse med kontor og laboratorier i Oslo, avdelingskontor i Trondheim og datterselskaper i Houston, Texas, USA og i Perth, Western Australia.

www.ngi.no

NGI (Norwegian Geotechnical Institute) is a leading international centre for research and consulting within the geosciences. NGI develops optimum solutions for society and offers expertise on the behaviour of soil, rock and snow and their interaction with the natural and built environment.

NGI works within the following sectors: Offshore energy – Building, Construction and Transportation – Natural Hazards – Environmental Engineering.

NGI is a private foundation with office and laboratories in Oslo, a branch office in Trondheim and daughter companies in Houston, Texas, USA and in Perth, Western Australia

www.ngi.no

