

Håndtering av avrenningsproblemer i Regionfelt Østlandet og Hjerkinns skytefelt

Rena, februar 2014

En oversikt over problemstillinger
og løsninger.
Dr. scient. Tore Østeraas



FORORD

Hensikten med denne rapporten er å formidle en del av den erfaring som Forsvarsbygg utvikling har høstet gjennom flere års arbeid med avrenningsproblemene i Regionfelt Østlandet og Hjerkinnskytefelt. En del av de løsningene som beskrives representerer ny tilnærming til gamle forurensningsproblemer som kan ha interesse, ikke bare for Forsvaret, men også for det sivile liv.

Løsningene er blitt til gjennom et samarbeid med flere personer og institusjoner i og utenfor Forsvaret. I Forsvarsbygg utvikling har Odd Erik Martinsen, Are Vestli og Svein Solli vært sentrale støttespillere, ikke minst ved å bidra til at nye og uprøvde metoder og løsninger ble evaluert og satt ut i livet. Også eksterne samarbeidspartnere har vært viktige bidragsytere. Spesielt nevnes Rolf Arne Kleiv NTNU, Steinar Slagnes, Sibelco Nordic AB

og Cecilie Lind, Ragn Sells AS som har stilt verdifull informasjon til rådighet og bidratt til bedre forståelse av de prosessene som er aktive i de beskrevne tiltaksløsningene. En takk til alle.

Det er å håpe at rapporten kan bli et nyttig oppslagsverk i det videre arbeide med å løse forurensningsproblemer i Forsvaret, ikke minst i aktive og nedlagte skytefelt. Løsningene som beskrives gjør ikke krav på å være de eneste riktige under alle forhold, men må mer betraktes som interessante alternativer til andre, mer tradisjonelle løsninger.

Rena, februar 2014
Tore Østeraas

INNHold

SAMMENDRAG	4
KAPITTEL 1	
FORURENSNINGSPROBLEMER OG RENSEMEDIER.....	7
FORURENSNINGSPROBLEMER I REGIONFELT ØSTLANDET OG HJERKINN SKYTEFELT	8
DE FORSVARSRELATERTE TUNGMETALLENE	11
Bly (Pb).....	11
Løselighet, transport og binding.....	11
Giftighet	13
Antimon (Sb)	13
Løselighet, transport og binding.....	14
Giftighet	14
Kobber (Cu)	14
Løselighet, transport og binding.....	15
Giftighet	15
Sink (Zn).....	16
Løselighet, transport og binding.....	16
Giftighet	17
Nikkel (Ni)	17
Løselighet, transport og binding.....	17
Giftighet	18
MINERALET OLIVIN – EGENSKAPER SOM SORBENT OG REAKTIVT MEDIUM	19
Olivinets bindingsegenskaper for tungmetaller	19
Renseevne.....	21
Adsorpsjonskapasitet	22
Stabilitet mot lekkasje.....	24
Oppholdstid	24
HMS.....	26
Blueguardprodukter som er benyttet av Forsvarsbygg Utvikling.....	26
DEKK-KLIPP	29
Dekk-klippets fysiske egenskaper	29
Dekk-klippets miljøegenskaper	29
BENTONITT.....	34
HMS.....	34
Bentonittprodukter som er benyttet av Forsvarsbygg Utvikling.....	34

KAPITTEL 2

PRAKTISKE LØSNINGER PÅ AVRENNINGSPROBLEMER I REGIONFELT ØSTLANDET OG HJERKINN SKYTEFELT

37

RENSELØSNINGER BRUKT PÅ HJERKINN

38

Filterløsninger ved Tverrfjellet gruve og Raufoss Metall..... 38

Perkolasjonsfilteret ved Jernbanestollen..... 39

Kontaktfilteret ved Jernbanestollen..... 44

Reaktiv kanal i Jernbanestollen 45

BRUK AV DEKK-KLIPP SOM RENSEMEDIUM FOR GRUVEVANN

OG FORURENSET PROSESSVANN

47

Rislefilteret i Jernbanestollen 47

Dekk-klippfilteret ved Oppland Metall..... 49

DET REAKTIVE DAMANLEGGET PÅ HFK-SLETTA

52

RENSEANLEGGET FOR TVERRFJELLET GRUVE.....

55

CAPPING AV HFK-SLETTA I SKYTEFELTET

57

DEPONIENE PÅ STORRANDEN

61

RENSELØSNINGER BRUKT I REGIONFELT ØSTLANDET OG RENA LEIR

66

Deponiene for tungmetallholdig materiale i Deifjellet og Styggdalen 66

Deponiet for skytevollmasser i Rena leir 71

Reaktiv barriere mot frangibelt støv i Rena leir 71

BRUK AV DEKK-KLIPP SOM SIKRING MOT EROSJON OG AVRENNING FRA SKYTEVOLLER.....

74

ANBEFALINGER

85

REFERANSER.....

86

SAMMENDRAG

Rapporten gir et tverrsnitt av en del problemstillinger og løsninger som er knyttet opp mot aktiviteten i Regionfelt Østlandet og Hjerkinns skytefelt. Kapittel 1, som omhandler forurensningsproblemer og rensemedier, åpner med å beskrive de forurensningsproblemer Forsvarsbygg utvikling måtte forholde seg til ved restaurering av Hjerkinns skytefelt og utbyggingen av RØ. I begge områdene ble en stilt ovenfor avrenningsproblemer som krevde nytenking og bruk av utradisjonelle tiltaksløsninger. Tungmetallene var hovedproblemet, enten de stammet fra naturlige forekomster eller fra Forsvarets aktivitet gjennom mange år.

For bedre å forstå filosofien bak de tiltaksløsningene som er valgt i RØ og Hjerkinns skytefelt er de tungmetallene som har skapt problemer i de to skytefeltene viet stor plass. Bly, kobber, antimon, nikkel og sink er beskrevet hver for seg med fokus på løselighet, transport og binding. Også metallenes giftighet og akseptable konsentrasjoner i vann og løsmasser er beskrevet. En viktig påpeking i beskrivelsen er at svært mange faktorer påvirker både tilstandsformen for tungmetallene og i hvilken grad de skaper forurensningsproblemer. Dette innebærer at ingen fullskala renseløsninger for tungmetaller bør settes ut i livet før relevante in situ-tester er gjennomført og har bekreftet at løsningene fungerer.

Mineralet olivin er benyttet i stort omfang, spesielt i Hjerkinns skytefelt. Mineralet ble valgt som sorbent for tungmetaller etter omfattende tester mot en kravspesifikasjon som inneholdt både rensetekniske, økonomiske og leveringsmessige krav. Mineralets spesielle egenskaper som sorbent er beskrevet i eget avsnitt hvor de viktigste faktorene som har betydning for funksjonen som rensemedium er behandlet. pH-egenskaper, renseevne, adsorpsjonskapasitet og stabilitet mot lekkasje er beskrevet med henvisning til egne og andres tester og forsøk.

Et eget avsnitt er viet de helsemessige aspekter ved bruk av olivin. Bakgrunnen for dette er at de fleste olivinforekomstene inneholder asbest som er kreftfremkallende og kvarts som gir silikose ved innånding. Kun én olivinforekomst er godkjent for bruk som rensemedium av Forsvarsbygg utvikling, nemlig Sibelcos forekomst i Åheim på Sunnmøre. Denne forekomsten inneholder ikke asbest eller fri kvarts.

Det viktigste olivinproduktet som er benyttet av Forsvarsbygg utvikling er Blueguard 63 som er en melfraksjon av olivin uten noen form for tilsetninger. Rapporten beskriver også andre olivinprodukter som er utviklet i samarbeid med Sibelco. Det viktigste er granulatet Blueguard G 1-3 som er spesielt godt egnet som filtermedium hvor det stilles krav til høy permeabilitet i tillegg til god renseevne.

I tillegg til olivin har Forsvarsbygg utvikling også benyttet dekk-klipp som tiltaksmedium i arbeidet med å begrense produksjonen og avrenningen av tungmetaller. Dekk-klipp har egenskaper som reduserer fragmenteringen og rikosjettingen av prosjektiler i skytevoller. I tillegg kan det i visse sammenhenger binde tungmetaller. I rapporten beskrives både dekk-klippets fysiske og miljømessige egenskaper. To typer dekk-klipp, enkeltklipp og multiklipp, er benyttet i forsøk og fullskala anlegg i RØ og Rena leir.

Spesiell interesse er knyttet til dekk-klippets miljømessige egenskaper. Klippet inneholder miljøgifter som PAH, PCB, naftalen, pyren og fenoler. Med unntak av fenoler er alle de nevnte miljøgiftene sterkt bundet i gummien og lekker ikke ut til omgivelsene unntatt ved brann. Fenoler kan imidlertid lekke fra multiklipp med konsentrasjoner som overstiger grenseverdien for toksiske effekter (PNEC) som er satt til 0,33 µg/l. I enkelte tilfeller kan fenollekkasjen begrense muligheten for bruken av dekk-klipp.

Et annet tiltaksmiddel som er brukt i Hjerkinns skytefelt er aktivert kalsiumbentonitt som sammen med Blueguard 63 er benyttet som tetningsmembran på hoveddeponiet for tungmetallforurenset materiale på Storranden. Kombinasjonen av Blueguard 63 og kalsiumbentonitt gir en svært robust og aldringsbestandig tetning som ble foretrukket på Storranden fremfor tradisjonell membran.

Kapittel 2 i rapporten beskriver praktiske løsninger på avrenningsproblemene i RØ og i Hjerkinns skytefelt. Kapitlet innledes med en beskrivelse av filterløsninger for tungmetallholdig overløpsvann fra Tverrfjellet gruve på Hjerkinns. Forsøkene med gruvevannet ble gjennomført i samarbeid med Bergvesenet som ønsket å benytte Forsvarsbygg utviklings kompetanse for løsning av egne forurensningsproblemer. To typer filtere ble testet, et

perkolasjonsfilter og et kontaktfilter. Begge filtertypene viste imponerende renseeffekter med over 95 % tilbakeholdelse av kadmium, kobber, nikkel, bly og sink etter 4 måneders drift. Verdifull erfaring om gjentetting, kanaldannelser og oppholdstid ble fremskaffet gjennom forsøkene. Samtidig ble det også gjennomført forsøk med motstrøms perkolasjonsfilter med tungmetallholdig prosessvann fra Raufoss metall for å klarlegge om tilsvarende resultater kunne oppnås med andre vanntyper. Også her var renseresultatene meget gode.

Kanaler, hvor bunnen er dekket med et reaktivt materiale, kan være en enkel og effektiv renseløsning for tungmetallholdige vannsig. Løsningen ble testet i Jernbanestollen i Tverrfjellet gruve hvor det ble bygget en 10 m lang og 1,2 m bred kanal med Blueguard olivingranulat som reaktivt medium. Kanalen ble belastet med 3 liter vann pr sek. Renseeffektene varierte noe for de enkelte tungmetallene. Etter at 6 000 m³ vann hadde passert kanalen var renseeffekten for kobber 99 %, mens den for sink var bare 23 %. Resultatene ble tolket som positive.

Parallelt med bygging og drift av den reaktive kanalen ble det også bygget et rislefilter for rensing av gruvevannet i Jernbanestollen. 30 tonn multiklipp ble brukt som rislemedium. Primært ønsket en å klarlegge om filteret kunne oksidere og felle toverdug jern. Filteret var svært effektivt til dette, men hadde også en overraskende god renseeffekt på tungmetaller. Etter at 10 000 m³ gruvevann hadde passert filteret var renseeffekten på bly og kobber nærmere 100 %, mens effekten for andre tungmetaller var liten. Den høye effekten for bly og kobber skyldtes sannsynligvis at disse metallene gjerne felles samtidig med at jernet oksideres.

De positive resultatene ved bruk av dekk-klipp som rensemedium ble videreført i et forsøk med olje- og tungmetallholdig prosessvann ved gjenvinningsbedriften Oppland Metall. Her ble vannet pumpet gjennom en tank fylt med 10 m³ multiklipp. Etter at 6 500 m³ vann hadde passert tanken var renseeffekten for kobber, sink og bly over 90 %. Sannsynligvis var årsaken til den gode effekten at mesteparten av tungmetallene var partikkelbundet og ble klebet til gummibitene i filteret sammen med oljen.

På Hjerkinns ble erfaringene fra forsøkene med gruvevann og tungmetallholdig industrivann utnyttet i et fullskala renseanlegg for Tverrfjellet gruve. Anlegget består av oksidasjonsgrøft med multiklipp for felling av jern, en reaktiv dam for felling av sink, en poleringsdam

og en oksidasjonsdam for nedbrytning av fenoler. Anlegget settes i drift våren 2014.

I Hjerkinns skytefelt er det to fullskala anlegg som er bygget hvor olivinprodukter og kalsiumbentonitt er brukt som tiltaksmidler. På HFK-sletta er Blueguard 63 benyttet som capping for å begrense avrenningen av tungmetaller fra Forsvarets aktivitet, gruvegrusdekket og oppgravd, tungmetallholdig morene. Lysimeterforsøk, som ble gjennomført i forkant av cappingen, viste at behandlingen øker pH og reduserer utløsningen av kobber og sink til sigevannet.

På Storranden ble det bygget et spesialdeponi for tungmetallholdige masser fra blenderinger, voller og veier i skytefeltet. Det nye deponiet ble lagt over et gammelt avfallsdeponi som en beskyttende skjerm for stoppe en kraftig lekkasje av tungmetaller som hadde pågått gjennom en årrekke. Deponiet ble bygget med en bunnsikring av Blueguard 63 som reaktivt medium. Toppsikringen ble gjort med en pulvermembran bestående av Blueguard 63 og aktivert kalsiumbentonitt. Tettheten ble testet i Hjerkinns PROs kryolab med simulering av både vinterkulde, sommervarme og sterk nedbør. Testen dokumenterte at pulvermembranen tilfredsstilte alle de krav som ble stilt i kravspesifikasjonen.

Etter at det nye deponiet ble bygget falt kobberkonsentrasjonen i prøvebrønnen for det gamle deponiet fra 2 800 µg/l til 9,5 µg/l. Samtidig økte pH fra 4,33 til 6,2. Løsningen var med andre ord vellykket.

Rapporten beskriver også renseløsninger som ble utviklet og brukt i RØ og Rena leir. Deponier for sterkt blyholdige fjellmasser ble bygd både ved skyteveggen i Deifjellet og ved ammunisjonslageret i Styggdalen. I begge deponiene ble det brukt Blueguard 63 som reaktivt filtermateriale i stedet for tette membraner. Også ved bane 2 i Rena leir ble det bygget deponi etter samme prinsipp. I dette tilfellet var de forurensede massene sterkt kobberholdig sand fra fangvollene på leirskytebanene. Ingen av deponiene lekker tungmetaller.

På bane 2 i Rena leir ble det bygget en spesiell reaktiv barriere for å fange opp kobberlekkasjen fra skyting med frangibel ammunisjon. Barrieren ble bygget med basis i en kolonnetest. Kolonnetesten viste at et 2 cm tykt lag med Blueguard G 1-3 dekket med 15 cm lokale masser fra standplassen reduserte kobberlekkasjen fra 2 200 µg/l til 43,8 µg/l. Vakuumsønder blir plassert under barrieren for å varsle når det reaktive materialet er mettet og må skiftes ut.

Et omfattende arbeid er gjort for å klarlegge om dekkklipp kan brukes for å sikre skytevoller mot erosjon og lekkasje av tungmetaller. Dekkklipp ble valgt etter at en rekke medier ble testet ved prøveskyting. Undersøkelser som ble gjort på skytevoller i angrepsfelt sør, på kortholdsbanene på Rødsætra og i Rena leir viste at erosjonsskadene reduseres sterkt når vollene dekkes med multiklipp. I tillegg blir fragmenteringen av prosjektiler redusert slik at tungmetallavrenningen avtar. Forsøk utført av FFI viste i tillegg at rikosjettfaren praktisk talt elimineres i voller som dekkes med multiklipp.

Selv om dekkklipp har mange gode egenskaper som vollmateriale, er det også ulemper knyttet til bruken. Dekkklipp inneholder tekstiler og gummistøv som kan antennes ved bruk av sporlyssammunisjon. Problemstil-

lingen er først og fremst aktuell der dekkklippet ligger tørt under tak. Et annet problem er lekkasjen av fenoler. Selv om lekkasjen vanligvis ligger godt under 5 µg/l kan dette medføre skader på følsomme organismer. Enkle og billige renseløsninger finnes som forslag, men er foreløpig ikke testet. Inn til videre er det derfor klare restriksjoner på bruk av dekkklipp bl.a. i skytevoller.

FOURENSNINGSPROBLEMER OG RENSEMEDIER

Kapitlet omhandler de viktigste forurensningsproblemene som Forsvarsbygg Utvikling har måttet forholde seg til i forbindelse med restaurering av Hjerkinns skytefelt og utbyggingen av Regionfelt Østlandet. I kapitlet beskrives også de rensemedier og andre tiltaksmidler som er brukt for å løse problemene.

De viktigste forurensningsproblemene er knyttet opp mot avrenning av tungmetaller. For lettere å forstå filosofien bak renseløsningene som er beskrevet i kapittel 2, er det tatt med en sammenstilling av de prosesser som styrer utløsning, transport og binding av tungmetallene.

Det understrekes at de rensemediene og tiltaksmidlene som er beskrevet i kapitlet er valgt ut fra en helhetsvurdering hvor en rekke forhold har hatt betydning for utfallet. Det utelukkes ikke at det kan finnes andre produkter eller løsninger som kan fungere like godt eller bedre i spesielle tilfeller.

FORURENSNINGSPROBLEMER I REGIONFELT ØSTLANDET OG HJERKINN SKYTEFELT

Forsvaret er en av de store aktørene når det gjelder bruk og spredning av tungmetaller i naturen. Spesielt representerer Forsvarets aktivitet i skytefeltene et stort forurensningspotensiale med bruk og spredning av en rekke tungmetaller hvorav bly, kobber og antimon er de viktigste. I tillegg skjer det også en betydelig spredning av andre metaller og kjemiske komponenter som ikke i samme grad gir avrenningsproblemer eller påvirker nærmiljøet.

Siden 2005 har Forsvarsbygg Utvikling vært engasjert i to store prosjekter hvor nye løsninger på avrenningsproblemene har vært et sentralt tema. De første utfordringene kom ved etableringen av Regionfelt Østlandet (RØ) hvor en hadde en klar målsetning om å minimalisere avrenningsproblemene. Etter som RØ ble etablert på jomfruelig mark, var dette et realistisk mål da en ikke hadde tidligere synder å ta hensyn til. Senere kom

restaureringen av Hjerkinnskytefelt inn med behov for nye løsninger på gamle forurensningsproblemer. Hjerkinnsprosjektet utviklet seg etter hvert til å bli en arena hvor nytenking og utprøving av alternative løsninger ble sentrale temaer.

I RØ og Hjerkinnskytefelt er det i tillegg til de forsvarsrelaterte tungmetallene også naturlig forekomst av tungmetaller i fjellgrunnen og løsmasser. Der disse materialene er brukt i forsvarsinstallasjoner som veier og plasser er metallene å betrakte som en menneskeskapt forurensning og må behandles deretter. Dette gjelder spesielt sink, nikkel og kadmium som finnes både i RØ og på Hjerkinnskytefelt. Nikkel er behandlet spesielt i de påfølgende avsnitt fordi sorbenten *olivin*, som inneholder nikkel, er brukt i stort omfang i Hjerkinnskytefelt. Også sink er beskrevet spesielt på grunn av til dels høye sinkverdier i gruvegrus og morene på Hjerkinnskytefelt.



Fig. 1. Skyteveggen i Deiffjellet. Fjellgrunnen domineres av en kvartsittisk sandstein med innslag av en mørk, tungmetallholdig skifer. Håndteringen av tungmetall-lekkasjen fra den nedknuste skiferen var starten på en lang utviklingsprosess mot de renseløsninger som er brukt både i RØ og i Hjerkinnskytefelt.



Fig. 2. Det første kontaktfilteret med olivin som ble bygget ved Deifjellet. Filteret er nærmere beskrevet under kapittel 2.

Håndtering av tungmetallproblemene både i RØ og i Hjerkinns skytefelt har i praksis vist seg å by på større utfordringer enn forventet. I RØ ble en potensielt alvorlig tungmetallavrenning fra naturlige forekomster avdekket ved rutinemessige vannanalyser i tilknytning til anleggsvirksomheten i Deifjellet. Store mengder tungmetallholdig pukk ble lagt ut på det lokale veinettet og medførte avrenning av bl.a. bly til omgivende terreng. For å stoppe forurensningen og unngå en ytterligere økning av tungmetallavrenningen i snøsmeltingen, var en avhengig av rask reaksjon. En rekke løsninger ble vurdert og forkastet. Fokus ble etter hvert rettet mot reaktive sorbenter som kunne fange opp og binde tungmetallene i avrenningen fra anleggsmassene. Det ble stilt en rekke krav til sorbentenes egenskaper og tilgjengelighet for å bli akseptert for ytterligere vurdering:

- Sorbenten måtte ha et dokumentert potensiale for permanent binding av tungmetaller.
- Sorbenten måtte tilfredsstille gjeldende HMS-krav, bl.a. til innholdet av helsefarlig, respirabelt støv (f.eks. asbest).
- Sorbenten måtte ikke skape nye forurensningsproblemer som f.eks. utlekking av fosfor, nitrogen eller andre miljøskadelige stoffer.
- Sorbenten måtte være tilgjengelig i meget store kvanta til en akseptabel pris.

Flere zeolitter¹ og mineralske produkter ble vurdert. Med bakgrunn i kravspesifikasjonen over ble en stående ved noen kalkprodukter og mineralet olivin som de mest aktuelle for videre utprøving. Ristetester med lekka-sjevann fra de tungmetallholdige pukkproduktene ble gjennomført, og *olivin 11*² kom klart best ut av testen. Produktet tilfredsstilte alle de kravene som ble stilt til egenskaper, tilgjengelighet og pris. Bindingsegenskapene for tungmetaller var for øvrig i samsvar med konklusjonene i et doktorarbeid fra NTNU³. Testresultatene medførte at det første kontaktfilteret med olivin som reaktivt filtermedium ble bygget. Formålet med *kontaktfilteret* var å fange opp tungmetallavrenningen fra de sterkeste forurensede veistrekningene ved Deifjellet. Filteret fungerte etter hensikten, og tungmetallkonsentrasjonen i resipienten falt raskt tilbake til bakgrunnsverdien.

Suksessen med kontaktfilteret ble starten på et langt utviklingsarbeid hvor olivinprodukter ble benyttet for håndtering av tungmetallproblemer både i RØ og på Hjerkinns. Rensemåteene ble også tilpasset for bruk i gruveindustrien og metallurgisk industri hvor avrenning av tungmetaller kan være et alvorlig problem. Løsningene er beskrevet i kapittel 2 i foreliggende rapport

Foruten avrenning av tungmetaller fra naturlige kilder og anlegg ble fokus tidlig satt på forurensningspotensia-

¹ Zeolitter er mikroporøse aluminiumsilikater av natrium eller kalsium som har evnen til å binde tungmetaller.

² T. Østeraas 2005: Tungmetaller i Deifjellet, Regionfelt Østlandet. Fagrapport, Forsvarsbygg Utvikling.

³ R. A. Kleiv 2001: Heavy metal adsorption on silicate tailings. Doctoral thesis NTNU Dept. of Geology and Mineral Engineering.

let i skytevoller i RØ, i Rødsmoen skytefelt og på skytebanene i Rena leir. Spesielt i RØ, med mye myr og sure løsmasser, er potensialet for avrenning av tungmetaller fra skytevoller stort. Det var et sterkt ønske om å finne løsninger som kunne redusere produksjonen og lekkasjen av tungmetaller fremfor å utvikle renseanlegg for å ta hånd om lekkasjevannet fra ubehandlede voller. Etter som det er en klar sammenheng mellom graden av fragmentering av prosjektiler ved anslag og potensialet for lekkasje av tungmetaller ble arbeidet konsentrert om å finne vollmaterialer med gode energidempende egenskaper. Forskjellige materialer som treflis, shoddy, løs Leca, lettbetong og plastgranulat ble prøvd før en ble stående ved *dekk-klipp* som det mest lovende materialet. En rekke forsøk med dekk-klippprodukter ble gjennomført med positivt resultat før de første skytebanene ble bygget med dette materialet på Rødsætra. Forsøkene dokumenterte ikke bare gode energidempende egenskaper, men også kraftig reduksjon av risikoen for rikosjetter. I tillegg ble det påvist at det er mulig å resirkulere prosjektiler fra gummimaterialet ved en enkel flotasjonsprosess. Dette er et viktig bidrag i arbeidet med å resirkulere metaller som ellers kan skape forurensningsproblemer ved Forsvarets aktiviteter.

En overraskende bieffekt av bruken av dekk-klipp som energidempende medium var tilbakeholdelse av visse tungmetaller, spesielt bly. Effekten ble også dokumentert på industriavløp og på tungmetallholdig gruveavløp i sivile prosjekter hvor Forsvarsbygg Utvikling etter hvert ble engasjert⁴.

I forbindelse med deponiene for tungmetallholdige løsmasser på Hjerkinns ble det stilt strenge krav om tetting av overflaten på deponiene. Dette gjaldt spesielt deponier som inneholdt antimon. Vanlige tetningsmembraner svekkes over tid på grunn av aldring og strekkpåkjenninger. På Hjerkinns, hvor det forutsettes at deponiene er tette i flere hundre år fremover, har Forsvarsbygg utviklet en bentonittbasert *capping* til erstatning for membraner. Komponentene som inngår i tetningslaget er olivin og en spesiell type svelleleire (*aktivert kalsiumbentonitt*) som har meget lang dekomponeringstid.

Som det fremgår er basisproduktene som er brukt i renseløsninger, deponier og skytevoller, *olivin*, *dekk-klipp* og *bentonitt*. Disse produktenes positive og negative egenskaper er beskrevet i de påfølgende avsnitt for bedre å forstå hvorfor produktene har fått en så sentral plass i



Fig. 3. Fra forsøkene med energidempende fangmaterialer på bane 2 i Rena leir. I dette oppsettet ble forskjellig materiale fra lettbetong til endetre og plastgranulat testet. Konklusjonene fra dette og andre forsøk var at dekk-klipp er det beste fangmaterialet når alle forhold tas i betraktning.



Fig. 4. Fra Ragn Sells dekk-klippager på Sjøkøya i Langesundsfjorden. Forsøkene som er gjort i regi av Forsvarsbygg Utvikling har avdekket flere bruksalternativer for dekk-klipp i Forsvaret.

løsningene både på Hjerkinns og i Østerdalen Garnison. Det understrekes at det kan finnes andre produkter som har tilsvarende egenskaper, men sammenligninger er ikke gjort i denne rapporten. Forsvarsbygg Utvikling har vært avhengig av å løse problemene raskt etter hvert som de har oppstått, og omfattede utprøving av mange produkter har derfor ikke vært mulig.

⁴ Avrenningsprosjekter ved Tverrfjellet og Løkken gruver samt industriavløp ved Oppland Metall og Raufoss Metall. Prosjektene er beskrevet i kapittel 2.

DE FORSVARSRELATERTE TUNGMETALLENE

I henhold til Miljødirektoratets definisjon tilhører tungmetallene gruppen *miljøgifter*, dvs. ”stoffer som selv i små konsentrasjoner kan gi skadeeffekter på naturmiljøet ved at de er giftige og kan oppkonsentreres til skadelige konsentrasjoner i næringskjeden og/eller har særlig lav nedbrytbarhet”.

I de følgende avsnitt er de viktigste forsvarsrelaterede tungmetallene og deres egenskaper og forurensningspotensiale beskrevet nærmere som grunnlag for de tiltak som er gjennomført i RØ og på Hjerkin. Valget av tungmetaller er gjort ut fra forekomsten og forurensningspotensialet i de to skytefeltene. I andre skytefelt kan det også være andre metaller som skaper problemer uten at dette er beskrevet nærmere i foreliggende rapport.

Metallenes giftighet er viet spesiell oppmerksomhet. Det må presiseres at giftigheten som regel må ses opp mot metallens tilstandsform og valens. Metaller kan i flere tilstandsformer være ufarlige, mens det samme metallet i andre tilstandsformer kan være svært giftig for organismer. *Nikkel* er et slikt metall hvor graden av giftighet kan variere fra ikke giftig til svært giftig avhengig av i hvilken form og forbindelse metallet opptrer i.

BLY (Pb)

Bly er et bløtt og korrosjonsbestandig metall med spesifikk vekt på 11,35. Metallet opptrer i mer enn 200 mineraler der det gjerne inngår i gitterstrukturen hvor andre metaller er erstattet med bly. Kaliumfeltspat og pegmatitter er viktige akkumulatorer for bly i naturen, men metallet finnes også i mørke skifere slik som i Deifjellet i RØ. I Deifjellskiferen opptrer blyet sammen med sink, nikkel og kadmium, hvilket er svært vanlig også i andre mørke skifere av samme type. På Hjerkin er den naturlige konsentrasjonen av bly lav, men metallet finnes som blyulfid (blyglans PbS) og blyulfat (PbSO_4) i en grå fyllitt.

Naturlige forekomster av bly regnes ikke som forurensning så lenge metallet eller metallholdig materiale ikke bearbeides eller forflyttes. Både i RØ og på Hjerkin

har blyholdige anleggsmasser blitt brukt i relativt stort omfang. Pr. definisjon er dette menneskeskapt forurensning som er underlagt de samme utslippskrav som annen tilførsel av bly.

På grunn av blyets høye spesifikke vekt har metallet blitt brukt i ammunisjon i lang tid, og store mengder bly ligger i Forsvarets skytefelt og på skytebaner rundt om i landet. Bare i Hjerkin skytefelt er det siden 1950 depotert ca 250 tonn bly. Da bly er et svært bløtt metall må det herdes før det kan brukes i prosjektiler. Til herding benyttes tungmetallet *antimon* (Sb). I likhet med bly er antimon toksisk og kombinasjonen av de to metallene representerer en betydelig forurensningsfare.

Løselighet, transport og binding

Bly finnes i ulike kjemiske og fysiske former (partikler, enkle organiske forbindelser, organiske komplekser og kolloider). Avledningen av hydrogenioner foregår langsomt på metallet hvilket medfører at bly står godt både i fortynnede syrer og baser. Hydroksider av bly er imidlertid noe vannløselig (ca 0,002g/100g ved 20°), mens blyulfat, blykarbonat og blyklorid er tungt løselig. De naturlige forekomstene av bly både i RØ og på Hjerkin antas i utgangspunktet å tilhøre de tungt løselige forbindelsene, men under gitte forhold kan det dannes Pb(OH)_2 som lekker til omgivelsene.

Bly opptrer svært spesielt i oksygenrikt vann hvor det skjer en tæring av overflaten med lekkasje av ioner til omgivelsene. I vann som inneholder sulfat og/eller karbonat dekkes derimot metallet av et beskyttende lag med tungtoppløselige salter. Den store lekkasjen av bly som ble påvist fra anleggsmassene i Deifjellet i RØ i forbindelse med byggingen av veier og standplasser antas å skyldes overrisling med oksygenrikt nedbørsvann⁵. På Hjerkin er prosjektilrester og annet metallisk bly korrodert og lekkasjen til omgivelsene er svært liten.

Bindingen av bly påvirkes av en rekke forhold hvor følgende faktorer betyr mest:

- pH
- Bindingsmediets kornfordeling

⁵ T. Østeraas 2005: Regionfelt Østlandet. Tungmetaller i grus- og pukkprodukter fra Deifjellet. Oppdragsrapport Interconsult.

- Bindingsmediets mineralogi og ionebyttingskapasitet
- Bindingsmediets innhold av organisk materiale
- Bindingsmediets innhold av hydroksider av jern, mangan og aluminium.

pH er sannsynligvis den enkeltfaktoren som påvirker løseligheten, mobiliteten og bindingen av bly mest. I fig. 5 er sammenhengen mellom pH og metallkonsentrasjonen i vann illustrert. Som det fremgår av figuren reduseres blykonsentrasjonen til et minimum ved pH ca. 9. En økning i bindingsmediets pH vil med andre ord også redusere lekkasjen. Unntak finnes imidlertid. Forsøk utført med blyholdig materiale fra Haukerget på Hjerkinns viste at innblanding av finknust olivin i prøven økte pH fra 5,8 til 8,5 uten at dette medførte reduksjon i avrenningen av bly. Årsaken er ikke klarlagt, men det kan ha en sammenheng med høyt innhold av visse organiske komponenter (TOC) og jernhydroksider som kan fungere som "metalltransportører" i lekkasjevannet.

pHs betydning for mobiliteten av bly kan ha stor innvirkning på avrenningspotensialet i skytefeltene. I Hjerkinns skytefelt, som domineres av basiske bergarter (grønnstein og kalkspatholdige glimmerskifer og fyllitter), er normal pH i løsmassene > 7. Dette er sannsynligvis hovedårsaken til at lekkasjen av bly til omgivelsene er svært liten, selv etter 80 års bruk av feltet. I RØ er situasjonene en helt annen hvor sure, kvartsittiske bergarter dominerer og medfører at løsmassene ofte har pH < 6. I tillegg er store deler av feltet dekket av myr med avrenning av humussyrer som bidrar til at løst bly forblir i løsnings og transporteres ut av feltet. På sikt kan det derfor bli en stor utfordring å hindre blylekkasje fra RØ forutsatt at bruken av blyholdig ammunisjon ikke begrenses eller bruken lokaliseres til områder hvor lekkasjepotensialet er lite.

Løsmassenes kornfordeling har en signifikant påvirkning på bindingen av bly etter som adsorpsjonen av bly til mineral- og bergartspartikler er en funksjon av materialets totale overflate. Løsmasser med høyt leirinnhold vil derfor gi et større adsorpsjonspotensiale enn løsmasser med grovkornet matriks. På den annen side reduseres permeabiliteten med avtagende kornstørrelse hvilket begrenser gjennomstrømningspotensialet. På tette morener, slik som en stort sett har i RØ, vil derfor mye av det metallholdige vannet renne av på overflaten og bindingspotensialet i løsmassenes finstoff utnyttes dårlig. Også her er forholdene mer gunstig på Hjerkinns. Den kvartær-

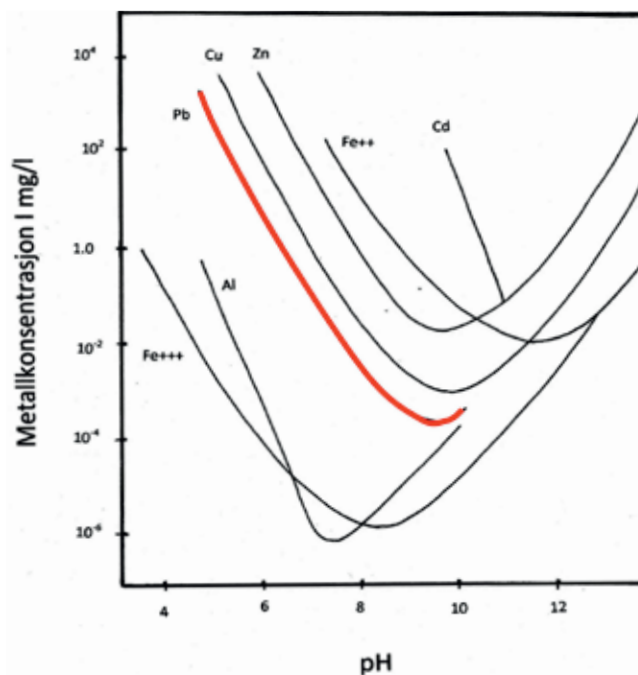


Fig. 5. Eksempel på sammenhengen mellom pH og metallkonsentrasjon i vann. Kurven for bly er uthevet. (Etter D.C. Adriano)

geologiske kartleggingen som ble foretatt i skytefeltet i 2011 viste at løsmassene stort sett har en gunstig kornfordeling og permeabilitet⁶.

Bindingsmediets mineralogi og ionebyttingskapasitet spiller en viktig rolle både gjennom påvirkningen av pH, ionebytting og direkte adsorpsjon til mineralets matriks. Forholdet er godt kjent, spesielt fra studier av leirmineralers evne til å binde bly. Som oftest bindes løste blyioner som metalloksider. På Hjerkinns, hvor løsmassene delvis inneholder fosforrike mineraler (apatitt), bindes blyet i en tilnærmet uløselig form i en *pyrrhomorfitt*.

I RØ, og spesielt i Hjerkinns skytefelt er mineralet *olivin* benyttet i stort omfang som et adsorpsjonsmedium for tungmetaller inklusive bly. Foruten de gode adsorpsjonsegenskapene påvirker mineralet også pH på en gunstig måte. Begrunnelsen for å velge olivin som adsorpsjonsmedium fremfor andre er beskrevet i et senere avsnitt og utdypes derfor ikke nærmere her⁷.

Bindingsmediets innhold av organisk materiale påvirker bindingskapasiteten ved at det dannes stabile ione-komplekser og gelater ved interaksjon med organiske komponenter. En rekke undersøkelser viser at forekomsten av organisk materiale ofte er den dominerende faktor ved blyadsorpsjonen, og i mange tilfeller viktigere

⁶ T. Borvik 2012: Kvartærgeologisk kart over sentrale Dovrefjell. Fagrapport UiB.

⁷ Se avsnittet «Mineralet olivin - egenskaper som sorbent og reaktivt medium»

enn adsorpsjonen til mineraloverflater⁸. Binding av bly til cellevevet i sphagnummoser er et godt eksempel på dette. Prosessen er imidlertid pH-avhengig, og tungmetallene løses ved nedbrytning av det organiske materialet.

Hvis det finnes *humussyrer* i løsmassene kan tungmetaller lekke ut av mediet. Humussyrene er store, organiske molekyler med negativt ladede COOH- og OH-grupper som kan danne organo-metalloide komplekser. Kompleksdannelsen skjer ved pH > 5 og kan medføre at bly og andre tungmetaller transporteres ut med lekkasjevannet. Sannsynligvis er dette hovedårsaken til at innblanding av potensielt tungmetalladsorberende medier med høy pH i forurensede masser med høyt humusinnhold kan gi lekkasje av tungmetaller i stedet for binding.

Omfanget av organisk binding av bly på Hjerkinns og i RØ er ikke kjent. På Hjerkinns med gunstig pH og tynne torvlag, som f.eks. i Haukberget-området, er potensialet for organisk binding klart til stede. I RØ er bindingspotensialet størst på skogsmark med råhumus. Det er kjent fra bl.a. sur *nedbør-prosjekter* i Sverige⁹ at bly bindes sterkt til det organiske materialet i råhumusen, til tross for lav pH. Feltmessig bruk av blyholdig ammunisjon på skogsmark i RØ gir derfor neppe de store avrenningsproblemene så lenge bly vurderes separat og forutsetningen for dannelse av humussyre ikke er til stede. Råhumusens gode adsorpsjonsegenskaper for tungmetaller gjelder altså ikke ubetinget. Skogsmark i RØ kan derfor ikke uten videre friskmeldes for ubegrenset bruk av arealene til feltmessig skyting.

Løsmassenes innhold av hydroksider av jern, mangan og aluminium kan spille en viktig rolle ved sorpsjonen av bly i løsmasser. Hydroksidene av disse metallene har høy sorpsjonskapasitet for flere tungmetaller, bl.a. bly. Forekomsten av hydroksidene er svært vanlig, spesielt i jordsmonnet eller den øverste, "levende" delen av løsmassene. I mange tilfeller er det vanskelig å avgjøre om tilbakeholdelsen av bly i jordsmonnet skyldes interaksjon med de organiske komponentene eller sorpsjon til hydroksidene.

Både på Hjerkinns og i RØ inneholder løsmassene høye konsentrasjoner av jern, mangan og aluminium. Potensialet for sorpsjon av bly til hydroksider av disse metallene er derfor til stede.

Giftighet

Bly hører økologisk til gruppen miljøgifter. Totalkonsentrasjonene av bly er som regel et dårlig mål på metallens toksisitet. *Labilt bly*, som er summen av frie metallioner og metall som lett kan dissosiere fra komplekser og kolloider, er mest biotilgjengelig og har høy giftighet.

Den økte bevisstheten om blyets skadevirkninger har medført en drastisk nedgang både i forbruket og skadeomfanget de senere årene. I Norge er f.eks. utslippet av bly redusert fra 600 tonn i 1995 til 110 tonn i 2010. Ammunisjon er nå den største utslippskilden for bly, og etter at blyhagl ble forbudt i 2005 er det Forsvaret som er den største synderen. Uforsiktig omgang med bly er fremdeles en kilde til skader.

Alle blyforbindelser, også de tungtløselige sulfatene og karbonatene, tas lett opp i organismen og forårsaker sterke forgiftninger som tarmkrampe (blykollikk) og lammelser. I tillegg skader bly de røde blodlegemene og nervesystemet. Fostre og små barn er særlig utsatt med motoriske forstyrrelser og hemmelse av hjerneutviklingen. Metallisk bly kan også trenge gjennom huden og inn i muskulaturen og forårsake lokale lammelser og leddsmarter.

Bly er regnet som svært giftig for alt liv i vann. Utslippskravene er strenge. Drikkevannsforskriften angir 10 µg/l som maksimumsverdi, mens veiledende grenseverdi for laksefisk er 20 µg/l og terskelverdien for grunnvann er 10 µg/l. På Hjerkinns er kravet til maksimal blykonsentrasjon i grunnvannet under deponiene på Storranden satt til < 0,5 µg/l. Kravet kan virke unødig strengt, og det arbeides for å få kravet justert opp til terskelverdien for grunnvann. For løsmasser er normverdien for mest følsom arealbruk satt til 60 mg/kg.

ANTIMON (Sb)

Antimon er et sprøtt metall med egenvekt 6,7. Det finnes i naturen i mer enn 100 mineraler, men bare ca 10 er vanlige. Kommersielt er *Stibnitt*, også kalt *spydglans* (Sb₂S₃), det viktigste antimonmineralet. Stibnitt er funnet på Hjerkinns, og utgjør i dette området sannsynligvis den viktigste kilden til naturlig antimon i løsmassene. XRF-undersøkelser har vist at antimon også finnes i lave konsentrasjoner i den mørke skiferen i Deifjellet i RØ.

Siden 1950 er det tilført ca 30 tonn antimon gjennom blyholdig ammunisjon til Hjerkinns skytefelt. Det har

⁸ D. C. Adriano 1986: Trace Elements in the terrestrial environment. University of Georgia. Institute of Ecology USA.

derfor vært vanlig antatt at forekomsten av antimon i skytefeltet kan føres tilbake til den militære aktiviteten. Påvisning av antimon i gruvegrus og urørt morene viser imidlertid at metallet ikke uten videre kan brukes som indikator på militær forurensning. Dette understreker viktigheten av å gjennomføre en god forundersøkelse, inklusive kartlegging av naturlige forekomster av tungmetaller, før tiltak iverksettes. Sannsynligvis er det totale innholdet av antimon i morenen på Hjerkinnt langt større enn det som er tilført gjennom den militære aktiviteten.

Antimon opptrer svært ofte sammen med arsen (As) og har mange sammenfallende egenskaper med dette metallet. Ofte finnes også små mengder edle metaller (gull og sølv) sammen med Antimon. Både i Deifjellet i RØ og på Hjerkinnt opptrer antimon sammen med arsen, gull og sølv. Konsentrasjonen av de edle metallene er imidlertid svært lav, spesielt i RØ.

I forsvarssammenheng brukes antimon for å øke blyets hardhet og mekaniske styrke i prosjektiler. Også blyplatene i batterier er herdet med antimon. Det er mistanke om at et av de gamle deponiene på Hjerkinnt kan inneholde kasserte blybatterier som kan gi opphav til antimonlekkasje. Så lenge batteriene inneholder syre er imidlertid faren for lekkasje liten etter som antimon i motsetning til de andre tungmetallene løses ved høy pH.

Antimon er giftig og har fått økende oppmerksomhet på grunn av omfattende bruk, ikke bare i ammunisjon, men også i plastikk, gummi, flammehedere og en rekke forbruksartikler. Både utslipp til luft ved forbrenning og avrenning av antimonholdig vann kan representere en alvorlig risiko for menneskers helse og miljøet generelt.

Løselighet, transport og binding

I motsetning til de fleste andre tungmetaller er kunnskapen om antimonets løselighet, transport og binding i løsmasser begrenset. Det er imidlertid allment kjent at antimon har høy mobilitet og løselighet og at mobiliteten øker drastisk med økende pH i motsetning til andre tungmetaller som løses ved lav pH. Det er også kjent at antimon bindes sterkt til visse jernsorbenter som jernoksid og jernhydroksid¹⁰.

Potensialet for avrenning av antimon er stort i Hjerkinnt skytefelt, både på grunn av bruk av blyholdig ammunisjon gjennom en lang periode og fordi det finnes natur-

lige forekomster i gruvegrus og morene. Til tross for dette viser NIVAs målinger¹¹ at avrenning til målestasjonene er liten. Dette tolkes som at det skjer en permanent immobilisering i løsmassene. Årsaken er uklar, men det kan ha sammenheng med at løsmassenes innhold av jernhydroksid er høyt. Etter som antimon tas forholdsvis lett opp i plantevev kan det heller ikke utelukkes at binding til organisk materiale bidrar til tilbakeholdelsen.

I RØ er det foreløpig ingen antimonproblemer. I likhet med for bly er det sannsynligvis minst risiko for lekkasje om den feltmessige skytingen med antimonholdig ammunisjon legges til skogsmark med råhumus, både på grunn av lav pH og innholdet av jernhydroksider.

Giftighet

Antimon er svært giftig selv i lave konsentrasjoner. Metallet forårsaker en rekke lidelser og er dødelig ved inntak av større doser. Selv små doser forårsaker oppkast, feber og oppsvelling av hender og føtter ("militærfeber").

I vann er antimonhydroksid ($\text{Sb}(\text{OH})_3$) ansett som den mest giftige formen. Hydroksidet opptrer imidlertid bare under anaerobe forhold, og den vanlige formen i rennende vann er en oksidert variant ($\text{Sb}(\text{OH})_6^-$) som er mindre giftig.

Antimon er også giftig for fisk og bunndyr i vann og vassdrag¹². Foreløpig er imidlertid kunnskapene om skadevirkningene begrenset og definitive grenseverdier for akseptable konsentrasjoner i vann foreligger ikke. Det foreligger heller ikke normverdier for mest følsom arealbruk. For drikkevann derimot er det satt en øvre grense på 5 µg/l som forøvrig samsvarer med terskelverdien for grunnvann.

KOBBER (Cu)

Kobber er et seigt og strekkbart metall med egenvekt på 8,96. Et spesielt trekk ved metallet er den store affiniteten til svovel, men metallet finnes også som oksider og karbonater. På Hjerkinnt og i RØ opptrer kobberet naturlig først og fremst som kobberkis (CuFeS_2) og som kobberkisholdig svovelkis ($\text{FeS}_2 + \text{CuFeS}_2$).

Kobber blir i stor utstrekning brukt i militært materiell, først og fremst i prosjektiler hvor mantelen gjerne består av en legering av kobber. Metallet inngår forøvrig som hovedbestanddel i en rekke legeringer som benyttes i Forsvaret. Mest vanlig er *messing* som er en legering av

¹⁰ G. Okkenhaug 2012: Mobility and solubility of antimony (Sb) in the environment. Doctoral thesis UMB Dept. of plan and environmental sciences.

¹¹ S. Rognerud 2012: Hjerkinnt skytefelt. Overvåkning av konsentrasjoner av metaller i bekker og elver. NIVA-rapport LNR 6309-2012

¹² E. Mariussen 2012: Analyses of antimony (Sb) in environmental samples. FFI-rapport.

kobber og sink, men som i tillegg inneholder små mengder av andre tungmetaller som f.eks. bly.

I Hjerkinns skytefelt er det deponert i størrelsesorden 770 tonn kobber fra ammunisjon siden 1950. I tillegg kommer kobberet i gruvegrusen som er brukt i stort omfang og som blir regnet som forsvarsrelatert forurensning. Kobber forekommer også naturlig i morenen hvilket i enkelte tilfeller gjør det vanskelig å avgjøre om en kobberlekkasje skyldes militær aktivitet eller stammer fra naturlige forekomster.

I RØ er det ikke påvist kobber ut over bakgrunnsverdien bortsett fra i skyteveggen i Deifjellet, i Ørnhaugen og i fjellhammeren hvor ammunisjonslageret ligger (Styggdalen). I ett tilfelle er det også påvist kobber ut over bakgrunnsverdien i morenemasser som er benyttet i en skytevoll øst for Østre Æra. Konsentrasjonen er i dette tilfellet lav og uten betydning for den totale avrenningen fra skytefeltet.

Løselighet, transport og binding

Løselighet, transport og binding av kobber er svært komplekst og ofte lite forutsigbart fordi ulike faktorer trekker i forskjellig retning. Visse faktorer er imidlertid viktigere enn andre for avrenningsbildet.

Kobber bindes sterkt til visse organiske komponenter og oksider av jern, aluminium og mangan. Også forekomst av svovel og karbonater gir sterk binding av metallet. I tillegg betyr innholdet av leirmineraler i bindingsmediet mye for tilbakeholdelsen. I jordsmonn, hvor disse komponentene er til stede, kan selv høye konsentrasjoner av kobber medføre liten eller ingen lekkasje av metallet forutsatt at pH ikke er for lav. Ved lav pH går kobberet i løsning og bindingsplassene i jordsmonnet inntas som regel av aluminium- og hydrogenioner (Al^{3+} og H^+). Innvirkningen av pH på metallkonsentrasjonen i vann er vist i fig.6.

Under aerobe forhold kan oksider av jern, aluminium og mangan spille en viktig rolle ved fiksering av kobber. Er forholdene anaerobe går kobberet i løsning og transporteres bort eller tungt løselig kobbersulfid dannes der mobilt svovel er til stede.

Betydningen av innholdet av organisk materiale i bindingsmediet er dokumentert gjennom en rekke forsøk¹³. Kobberet danner stabile komplekser med humussyrer i omdannet torv og råhumus, og bindingen kan være like

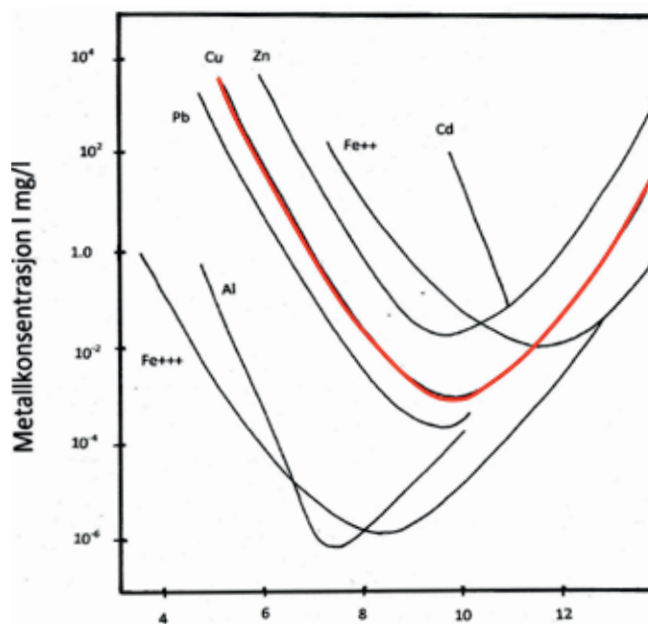


Fig. 6. Eksempel på sammenhengen mellom pH og metallkonsentrasjon i vann. Kurven for kobber er uthevet. (Etter D.C. Adriano).

sterk som i oksider av mangan og jern. Bindingen overstyres imidlertid av pH som påpekt i foregående avsnitt. Kobberet frigis ved nedbrytning av det organiske materialet.

Vurdert opp mot hverandre synes pH og redoks å være de viktigste faktorene når det gjelder mobiliteten og faren for avrenning av kobber til omgivelsene. På Hjerkinns, hvor pH i løsmassene er høy og hvor svovel, karbonater, jern og mangan forekommer i rikelige mengder, er forutsetningene for tilbakeholdelse av kobber svært god. Overvåkingen av avrenningen viser da også at kobberkonsentrasjonen i vannet er lav, også fra de områdene hvor det er deponert store mengder ammunisjon i terrenget. I RØ er situasjonen mer ugunstig, først og fremst på grunn av lav pH, men også fordi en har anaerobe forhold og negativ redoks i store deler av feltet.

Giftighet

Metallisk kobber i små mengder er i motsetning til andre tungmetaller ikke giftig for mennesker. Tvert imot er kobber en del av den menneskelige metabolismen og inngår i flere enzymer og proteiner. Ved inntak av større mengder og ved innånding av kobberstøv kan imidlertid forgiftningssymptomer oppstå (kobbersyke). Hodepine, svimmelhet, magesmerte og oppkast er vanlige reaksjoner. Sterk forgiftning kan føre til magesykdommer og lever- og nyreskader.

¹³ P. R. Bloom et. al. 1981: Chemistry in the soil environment. ASA Spec.Publ. no.40, UW Madison, USA.

For fisk og vannlevende organismer er kobber giftig også i svært lave konsentrasjoner, og metallet har stor betydning både for livsvilkår og reproduksjon. Kobberet hemmer viktige biokjemiske reaksjoner som bl.a. fører til redusert overlevelse av egg og larver. Blant pattedyr er det registrert lav toleranse for kobber hos lam, og det foreligger mistanke om at beitende lam i skytefelt kan ha blitt forgiftet etter å ha drukket kobberholdig avrenning fra skytebaner.

I motsetning til metallisk kobber er enkelte kobberforbindelser giftige også for mennesker selv ved lave konsentrasjoner. *Irr*, som enten består av *kobbersulfat* (CuSO_4) eller *kobberkarbonat* (CuCO_3) er et eksempel på dette.

Utslippskravene for kobber er svært forskjellig for vannlevende organismer og mennesker. I drikkevannsforskriften er grenseverdien satt til 2 mg/l. For vannlevende organismer er det ikke satt noen definitiv grense, men skader på egg og larver er registrert helt ned til $< 10 \mu\text{g/l}$. I løsmasser er normverdien for mest følsom arealbruk satt til 100 mg/kg. Terskelverdien for grunnvann er satt til $8 \mu\text{g/l}$. I grunnvannet under deponiet på Storranden er kravet $0,6 \mu\text{g/l}$ som tilsvarer målt bakgrunnsverdi i nærliggende grunnvannskilder.

SINK (Zn)

Sink er et uedelt metall som finnes i stort omfang i naturen. Ved vanlig temperatur er metallet sprøtt med egenvekt på 7,1. Ved temperaturer over 100° er metallet seigt og formbart. Sink opptrer i forskjellige former som sulfider, karbonater eller silikater hvorav *sinkblendende* (ZnS) er den mest vanlige på Hjerkin. I spenningsrekken står sink høyt oppe, dvs. at metallet oksiderer lett.

I forsvarssammenheng er sink mest brukt til rustbeskyttelse (galvanisering) av jern, og Forsvarets bidrag til sinkkonsentrasjonen i løsmassene i RØ og på Hjerkin anses som ubetydelig. Derimot kan sinkinnholdet i gruvegrus, pukklprodukter og morene være svært høyt og forårsake avrenning av sinkholdig vann. I avrenningen fra f.eks. Tverrfjellet gruver på Hjerkin er sinkkonsentrasjonen hele 3,7 mg/l, som er langt over akseptabel konsentrasjon for laksefisk og 10 ganger høyere enn grenseverdien i drikkevannsforskriften.

Løselighet, transport og binding

pH er den faktor som påvirker løseligheten av sink mest (fig. 7.). Metallet felles ved både lav og høy pH med den gunstigste pH-området for felling rundt 9. I

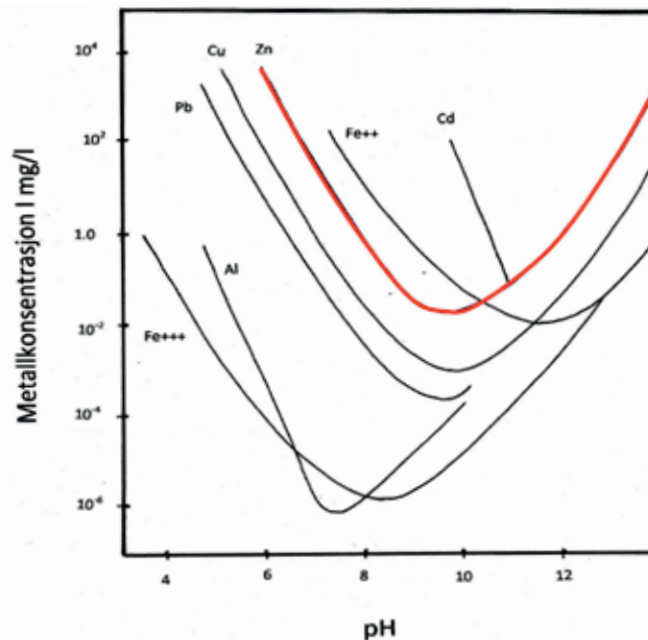


Fig. 7. Eksempel på sammenhengen mellom pH og metallkonsentrasjon i vann. Kurven for sink er uthevet. (Etter D.C. Adriano)

områder hvor det finnes *kalsiumkarbonat* (CaCO_3) i løsmassene slik som på Hjerkin, skjer det en sterk binding av metallet. Er forholdene anaerobe med negativt redokspotensial og tilstedeværelse av svovel dannes det uløselig sink sulfid.

Ved tilstedeværelsen av organiske syrer dannes det komplekse bindinger av sink. Som figuren på neste side viser skjer bindingen over hele pH-skalaen mellom pH 4 og pH 12. Dette kan være av stor betydning i områder med avrenning av humussyrer fordi de organiske kompleksbindingene ikke bunnfelles, men følger vannstrømmen.

På Hjerkin er sinkkonsentrasjonen i NIVAs målepunkter med visse unntak svært lav til tross for at sink forekommer i tildels høye konsentrasjoner i løsmassene. Høy pH og høyt innhold av kalsiumkarbonat og svovel medfører sterk binding av sink. I to av NIVAs målepunkter er sinkkonsentrasjonen imidlertid svært høy, nemlig i en grunnvannsbrønn og et tjern i tilknytning til en gammel avfallsfylling på Storranden hvor bl.a. ammunisjonsrester og kassert forsvarsmateriell er deponert. Lekkasje kan sannsynligvis tilskrives lav pH som i grunnvannsbrønnen er målt til $< 4,5$.

I RØ er det neppe grunn til å forvente lekkasje av sink til resipientene. Den naturlige sinkkonsentrasjonen er lav, og tilførselen av sink gjennom Forsvarets aktivitet er ubetydelig.

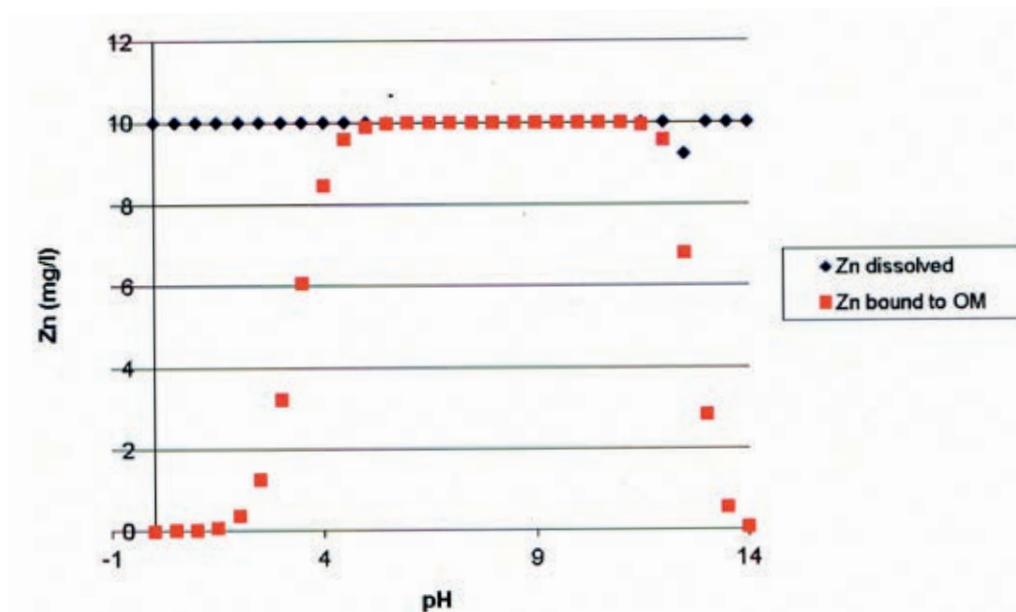


Fig. 8. Sammenhengen mellom pH og kompleksbinding av sink ved tilstedeværelse av organiske syrer. (Etter Block et. al.¹⁴)

Giftighet

I motsetning til bly, kobber og antimon, som er definert som *giftige* eller *helseskadelige*, er sink klassifisert som *uønsket i høye konsentrasjoner* i Miljødirektoratets definisjon. Sink i små eller moderate mengder er nødvendig for en rekke prosesser da metallet inngår bl.a. i enzymer og proteiner. Sink er dessuten sunt for immunforsvaret og brukes i legemidler mot eksem og allergier.

En viktig egenskap ved sink er at det kan erstatte andre tungmetaller og derved medvirke til at f.eks. bly og kobber fjernes fra kroppen. Ved høyt inntak er sink toksisk og gir kvalme, hodepine og svimmelhet.

Fisk og vannlevende organismer er langt mer følsom for sink enn pattedyr. Mens grenseverdien for sink i drikkevannsforskriften er satt til 300 µg/l er det påvist negativ virkning på egg av laksefisk ved konsentrasjoner < 10 µg/l. Normverdien for sink i løsmasser er satt til 100 mg/kg, mens det ikke finnes terskelverdi i grunnvann. Grenseverdien for grunnvann under deponiet på Storranden er satt til 5 µg/l, mens bakgrunnsverdien i grunnvannet ligger på ca 0,4 µg/l i Storrandenområdet.

NIKKEL (Ni)

Nikkel er et korrosjonsbestandig og varmekraftig metall med egenvekt på 8,9. I naturen finnes som regel metallet i små konsentrasjoner i tilknytning til sulfider, arsenider

og antimonider, f.eks. i *magnetkis* (FeS), *Ni-Mg-silikater* og *Ni-As-ertser*. Magnetkisen i Tverrfjellet på Hjerkinne inneholder 2 - 3 % nikkel. Også gruvegrusen og bunnmorenen i skytefeltet inneholder nikkel. Høyeste målte verdi i gruvegrusen er 154 mg/kg som er 3 ganger høyere enn normverdien for løsmasser. I RØ er det påvist nikkel i Ørnhaugen, og avrenningen fra nordre del av PFA-sletta inneholder noe nikkel som stammer fra nedknust fjell i Ørnhaugen.

Mens metallet i gruvegrusen på Hjerkinne nesten utelukkende stammer fra magnetkis kan innholdet i morenen også stamme fra bergarten apatitt som finnes i små forekomster i skytefeltet. Tilførselen av nikkel gjennom Forsvarets aktivitet er uten praktisk betydning både på Hjerkinne og i RØ.

Olivin, som er brukt som sorbent for tungmetaller på Hjerkinne, inneholder nikkel. Konsentrasjonen er imidlertid svært lav (< 0,3 %) og metallet er sterkt bundet til mineralgitteret. Under visse forhold kan imidlertid små mengder nikkel lekke ut ved at tungmetaller som bly eller kobber erstatter nikkel i mineralgitteret. Forholdet er nærmere beskrevet under avsnittet "Mineralet olivin - egenskaper som sorbent og reaktivt medium".

Løselighet, transport og binding

I motsetning til de fleste andre metaller er nikkel relativt stabilt over et vidt pH- og redoksspekter. Det er likevel en klar økning i løseligheten når pH synker under nøy-

¹⁴ C. Block et.al. 2013: Waste water treatment Maatheide Lommel (Belgium). KU Leuven – Dept. Chemical

tralpunktet. Også innholdet av organisk materiale påvirker løselighet og binding. Råhumus og omdannet torv kan holde tilbake nikkel i komplekse bindinger forutsatt at pH ikke er for lav. Ved nedbrytning av det organisk materiale dannes det organiske syrer som kan gelatere nikkel og øke mobiliteten sterkt.

Stort sett skaper nikkel små eller ingen forurensningsproblemer på Hjerkinns og i RØ. Enkeltp prøver i NIVAs overvåkningsmateriale på Hjerkinns viser moderat lekkasje som stammer fra gruvegrus som er brukt som slitelag på veier. Også prøver av lekkasjevann fra gruvegrusdekket på HFK-sletta viser forhøyede konsentrasjoner. Høyeste målte verdi er 17 µg/l som er lavere enn grenseverdien for drikkevann, men vesentlig høyere enn grenseverdien for laksefisk. Det er også påvist nikkel i grunnvannet under det gamle deponiet på Storranden. Konsentrasjonene er imidlertid så lave at de miljømessige konsekvensene er neglisjerbare. Også avrenningen av nikkel fra PFA-sletta i RØ er så lav at tiltak ikke er nødvendig.

Giftighet

Nikkel er definert som *giftig/helseskadelig*, først og fremst ved at metallet fremkaller sterke allergiske reaksjoner (nikkelallergi). Ca 10 % av norske kvinner er f.eks. allergiske mot nikkel. I likhet med de andre tungmetallene akkumuleres nikkel i kroppen og kan gi akutt nikkelforgiftning ved langvarig eksponering. Nikkel er også definert som kreftfremkallende.

Tilstandsformen er svært viktig for metallens giftighet. Vannløselig nikkel (Ni^{2+}) har små skadevirkninger, mens f.eks. forbindelsen *nikkelkarbonyl* $\text{Ni}(\text{CO})_4$ er meget giftig. Dette stoffet er forøvrig ikke giftig på grunn av nikkel, men på grunn av dissosiasjon av CO-gruppene. I sorbenten *olivin*, som er brukt i stort omfang i Hjerkinns skytefelt, er metallet silikatbundet, og ingen av de beskrevne forgiftningstypene er relevante.

Vannlevende organismer er langt mer følsomme for nikkel enn mennesker. Mens drikkevannsforskriften setter grenseverdien til 20 µg/l er grenseverdien for laksefisk 10 µg/l. Terskelverdi for grunnvann er 6 µg/l, og normverdien i løsmasser 50 mg/kg. For grunnvannet under deponiet på Storranden er grenseverdien satt til 5 µg/l, mens bakgrunnsverdien i grunnvannet i Storrandenområdet er ca 0,3 µg/l.

MINERALET OLIVIN - EGENSKAPER SOM SORBENT OG REAKTIVT MEDIUM

Olivin er et grønnlig, sprøtt og glassaktig mineral med egenvekt 3,3. Viktigste bestanddel er *magnesium-jernsilikat* med blandkrystaller mellom *fosteritt* Mg_2SiO_4 og *fayalitt* Fe_2SiO_4 . Mineraler forekommer i en rekke bergarter som gabbro, basalt, peridotitt og dunitt. Det er også en viktig bestanddel av mange meteoritter, og er bl.a. funnet i bergarter på månen. Rene forekomster av mineralet er meget sjeldne. Den største forekomsten av ren olivin i verden finner en i en *dunitt* i Åheim på Sunnmøre hvor olivininnholdet er over 90 %. Det estimerte volumet på denne forekomsten er over 80 milliarder tonn.

Olivin er blitt kalt "Det grønne gull", både på grunn av fargen og det store bruksområdet fra smykkestein (*peridot*) til slaggdanner i stålindustrien. Det er ett av Norges viktigste industrimineraler, og ca halvparten av verdens forbruk av olivin stammer fra forekomster i Norge.

Den kjemiske sammensetningen på mineralet kan variere fra forekomst til forekomst. Olivinen i Åheim, som er benyttet i Forsvarsbyggs anlegg, har følgende sammensetning:

MgO	49 %
SiO ₂	41 %
Fe ₂ O ₃	7 %
Al ₂ O ₃	0,5 %
Cr ₂ O ₃	0,3 %
NiO	0,3 %
MnO	0,1 %
CaO	0,1 %

Olivin er regnet som et meget miljøvennlig mineral som i nedknust form har evnen til å binde metaller. Mineraler kan derfor brukes som filtermedium for tilbakeholdelse av tungmetaller. Forsvarsbygg Utvikling er verdens største bruker av olivin som filtermedium og har vært aktivt med i utviklingen av nye olivinbaserte filterprodukter.

Ikke all olivin er egnet som filtermedium. Tvert i mot er de fleste olivinforekomster av en slik kvalitet at de ikke

kan brukes. Et vanlig problem er høyt innhold av *asbestrik serpentin*. Ved knusing av det asbestholdige mineralet produseres det respirabelt støv som kan fremkalle kreft. Høyt kvartsinnhold er også uheldig da det kan gi *silikose (steinlunge)* ved inhalering av støvet. Forsvarsbygg Utvikling har vært klar på at det bare er ren olivin uten asbest, kvarts eller andre helsefarlige stoffer som aksepteres i filterproduktene. Pr. i dag er det kun olivin fra Åheim som tilfredsstiller Forsvarsbyggs krav. Innholdet av asbest er f. eks. ekstremt lavt i Åheimolivinen. Også innholdet av fri kvarts er svært lavt (< 0,008 %) ¹⁵. Kvartsen stammer forøvrig fra bergarter utenfor olivinforekomsten.

OLIVINETS BINDINGSEGENSKAPER FOR TUNGMETALLER

En rekke studier ¹⁶ viser at silikatmineraler av typen olivin kan benyttes til å holde tilbake tungmetaller i forurenset vann og kontaminerte sedimenter. Forutsetningen for å få denne effekten er at mineralene foreligger som et fint pulver slik at den reaktive overflaten blir så stor som mulig. For fingradert olivin er en kombinasjon av høy sorpsjonskapasitet for tungmetaller under subnøytrale forhold, høy bufferkapasitet og liten følsomhet for ione-styrkevariasjoner egenskaper som gjør mineralet svært interessant som bindingsmedium. Hvilke bindingsprosesser som er aktive er foreløpig ikke fullt ut klarlagt. Det har imidlertid vært vanlig antatt at adsorpsjon til mineraloverflaten (fysikalsk adsorpsjon) og binding til hydroksider har vært de viktigste mekanismene for immobilisering av metallene. Senere forsøk har vist at kjemisorpsjon med permanent binding til mineralets gitterstruktur kan være en vel så viktig mekanisme.

I de følgende avsnitt er noen viktige egenskaper ved mineralet samt forutsetninger for olivinet bindingsegenskaper diskutert.

pH.

Sorpsjonsegenskapene er svært pH-avhengig. Ved lav pH foreligger tungmetallionene i løsning og H⁺-ioner blokkerer bindingsplassene på sorbenten. Ved økning i pH reduseres H⁺-konsentrasjonen og bindingsplasser

¹⁵ K. Moen 2005: Quantification of quartz in olivine product. AFS50. NTNU Report

¹⁶ R. A. Kleiv 2001: Heavy metal adsorption on silicate tailings. Doctoral Thesis NTNU, Trondheim

fristilles. Når tungmetallforurensningen finnes i sure løsninger er effekten av en pH-heving derfor markant.

Sorbenter som automatisk hever pH uten tilsetning av kjemikalier i det forurensede vannet er langt å foretrekke både rent praktisk og økonomisk. Olivin er en sorbent med disse egenskapene. I tabellen nedenfor er den pH-regulerende kapasiteten for olivin sammenlignet med et utvalg av karbonater og silikater. Tabellen viser at nøytraliseringspotensialet for olivin (forsteritt) er nesten dobbelt så høyt som for kalkspat. Dette er overraskende for de fleste etter som kalkspat er nesten enerådende i markedet som nøytraliseringsmineral. Fordelen med

kalkspat fremfor olivin er imidlertid at den reagerer langt raskere, spesielt i svakt sure løsninger.

Sammenhengen mellom pH og tilbakeholdelsen av tungmetaller er dokumentert i flere forsøk hvor olivin er brukt som sorbent. Fig. 9 nedenfor viser et typisk retensjonsdiagram hvor sammenhengen er svært godt illustrert. Det må imidlertid understrekes at diagrammet gjelder for rene løsninger. Hvis vannet inneholder organiske syrer eller andre kjemiske komponenter kan retensjonskurven ha et annet forløp. Det er derfor svært viktig at det forurensede vannets sammensetning klarlegges før olivin besluttet brukt som

Tabell 1. Sammenligning av pH-regulerende kapasitet for utvalgte karbonater og silikater (etter Rolf Arne Kleiv).

Mineral	Kjemisk formel	Tetthet g/cm ³	Nøytralisasjonspotensial	
			mmolH ⁺ /g	mmolH ⁺ /cm ³
Kalkspat	CaCO ₃	2.72	19.98	54.35
Dolomitt	CaMg(CO ₃) ₂	2.86	21.69	62.04
Magnesitt	MgCO ₃	2.98	23.72	70.68
Forsteritt	Mg ₂ SiO ₄	3.23	28.43	90.97
Plagioklas	CaAl ₃ Si ₂ O ₈	2.76	28.77	78.66
Enstatitt	MgSiO ₃	3.22	19.92	63.75

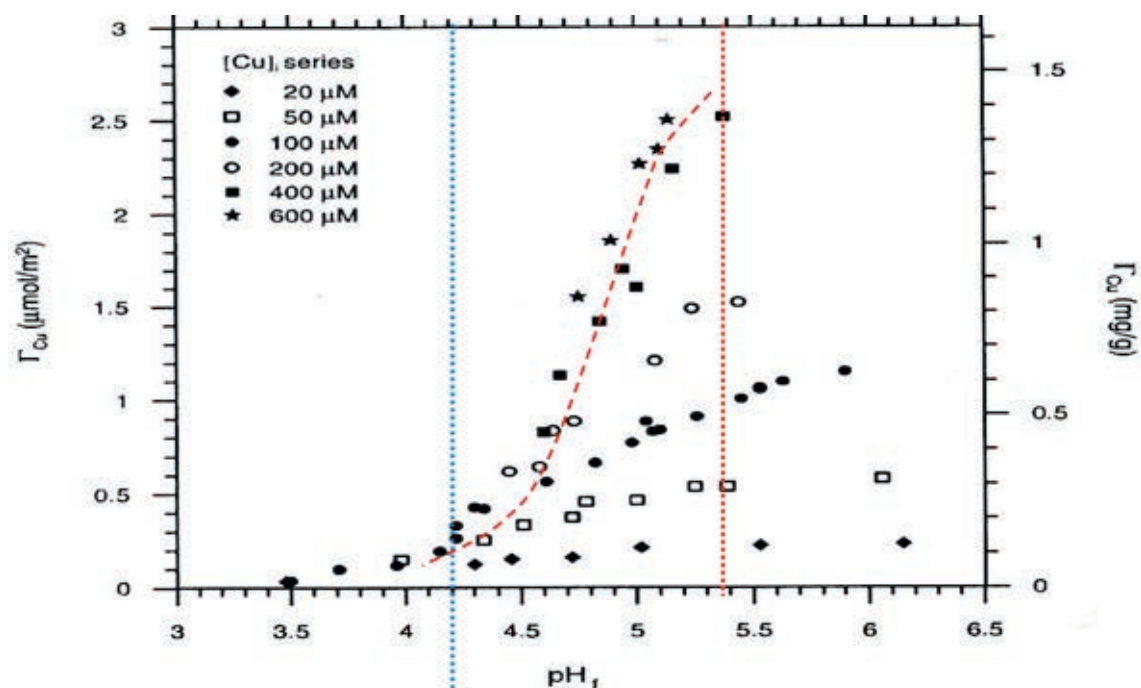


Fig. 9. Binding av kobber som funksjon av pH og mengden kobber som er holdt tilbake pr gram olivin. Ved en økning i pH fra 4,2 til 5,4 øker retensjonen fra 0,1mg/g til 1,4mg/g for løsninger med høyest kobberkonsentrasjon. (Modifisert etter Kleiv & Sandvik)¹⁷.

¹⁷ R. A. Kleiv, K. L. Sandvik: Modelling copper adsorption on olivine process dust using simple linear multivariable regression model. Minerals Engineering 15, 2002.

sorbent. De sikreste resultatene får en enten ved å kjøre ristetester, kolonnetester eller lysimetertester med det aktuelle vannet. Dette gjelder forøvrig uansett hvilket sorbsjonsmedium som planlegges brukt.

RENSEEVNE

I denne sammenheng defineres renseevne som *evnen til å binde tungmetaller og andre uønskede kjemiske forbindelser i et rensemedium*. Vanligvis forventes det også at bindingen skal være permanent innefor visse grenser. For olivin er renseevnen knyttet opp mot det finmalte produktet som har fått betegnelsen *Blueguard 63*. Grovkornet olivin har ingen renseevne. Ved nedknusing øker den spesifikke overflaten og mineralets gitterstruktur brytes opp slik at bindingsplasser for tungmetaller blir fristilt.

Forsvarsbygg Utvikling har utnyttet olivinet bindingsegenskaper til forskjellige formål:

- Som perkolasjonsfilter
- Som kontaktfilter
- I reaktive dammer
- Som fellingsmedium
- Som cappingmateriale

Perkolasjonsfilter er en renseløsning hvor det forurensede vannet strømmer gjennom filtermediet med selvfall (gravitasjonsfiltere) eller under trykk (motstrømsfiltere). Løsningen gir svært god kontakt mellom det forurensede vannet og filterpartiklene med optimale forhold

for binding av tungmetallene. Blueguard 63 har lav permeabilitet¹⁸ og kan derfor ikke brukes som filtermedium i perkolasjonsfiltere. For å bøte på dette har Sibelco i samarbeide med Forsvarsbygg utviklet et granulat med Blueguard 63 som reaktivt materiale. Granulatet har høy permeabilitet samtidig som bindingsegenskapene for tungmetaller er opprettholdt.

I perkolasjonsfiltere, hvor granulatet er brukt som filtermedium, strømmer det forurensede vannet både mellom filterpartiklene og internt i hver enkelt partikkel (granul). Den interne strømmingen går langsomt, men er langt mer effektiv enn den frie strømmingen mellom partiklene.

Både granulatet og perkolasjonsfiltrene er beskrevet nærmere i et senere avsnitt.

Kontaktfilter er en renseløsning hvor det forurensede vannet renner ved selvfall på overflaten av et reaktivt filter. Forurensningene i vannet adsorberes til tilgjengelige bindingsplasser på filterpartiklene på samme måte som i et perkolasjonsfilter. I motsetning til perkolasjonsfilterne kan kontaktfilterne bestå av lavpermeabelt materiale som f.eks. Blueguard 63. Adsorpsjonseffekten er imidlertid større hvis det benyttes et permeabelt granulat som filtermedium. Forutsetningen for at et kontaktfilter skal fungere effektivt er at det forurensede vannet renner som et tynt sjikt over filterflaten. Filterets effekt er i tillegg en funksjon av oppholdstiden/filterflatens størrelse.

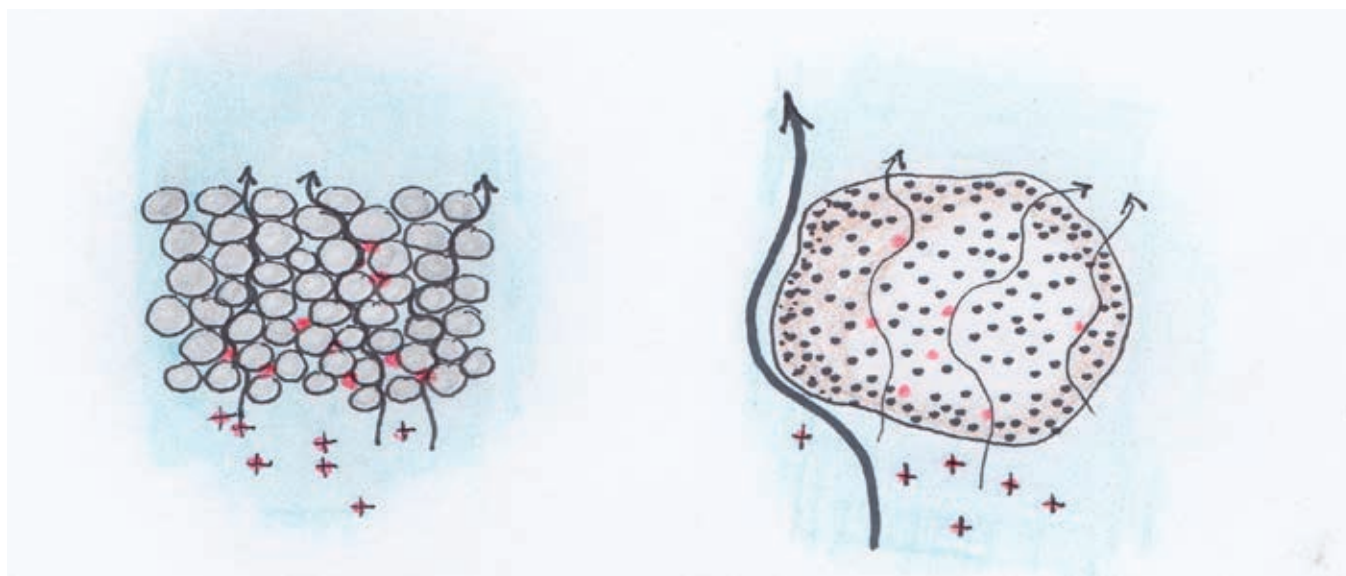


Fig. 10. I perkolasjonsfiltere med granulat som filtermedium strømmer det forurensede vannet både gjennom hulrommene i filteret (venstre) og internt i hver enkelt granul (høyre). Den interne strømmingen er langsom, men effektiv.

¹⁸ K= 5,51 m/år i henhold til målinger gjort av NGI

Ved behandling av store vannmengder er filterløsningen langt mer arealkrevende enn perkolasjonsfilterne.

Forsvarsbygg Utvikling har brukt kontaktfiltere med olivin som reaktivt materiale både i RØ og ved Tverrfjellet gruver på Hjerkin. Løsningene og renseresultatene er beskrevet i et senere avsnitt.

Reaktive dammer er en renseløsning hvor bunnen i en rensedam dekkes med et reaktivt materiale som kan binde tungmetaller. Rensemessig fungerer en reaktiv dam som et kontaktfilter, men effekten er vesentlig dårligere fordi mindre deler av vannvolumet kommer i kontakt med filteroverflaten. Renseløsningen er først og fremst aktuell som et poleringstrinn med lang oppholdstid. For å unngå kortslutningsstrømmer, som kan redusere renseeffekten drastisk, er utformingen av dammene kritisk.

Rensedammer med olivin som reaktivt bunnsediment er brukt av Forsvarsbygg Utvikling i Hjerkin skytefelt.

Blueguard 63 kan brukes som *adsorpsjonsfellingsmedium* for tungmetaller ved at produktet blandes inn i det forurensette vannet. Foreløpig har en forholdsvis liten erfaring med dette, men laboratorieforsøk utført av Sibelco, KU-Leuven – Dept. Chemical Engineering og Forsvarsbygg Utvikling viser at metoden kan være interessant hvor felling er et alternativ for å holde tilbake tungmetaller. Fig. 11 i avsnittet *Adsorpsjonskapasitet* viser at Blueguard 63 kan være svært effektivt for felling av sink og kadmium. Pågående forsøk med felling av kobber i forbindelse med rensing av avløpsvannet fra Løkken og Follidal gruver har også gitt lovende resultater. Blueguard 63 er for øvrig foreslått som fellingsmedium for sink ved Tverrfjellet gruver på Hjerkin hvis utslippskravene til sink blir skjerpet.

Olivin kan brukes som en aktiv ingrediens ved *capping* av forurenset sjø- eller elvebunn eller som toppdekke på deponier av forurenset materiale på landjorden. I Forsvarsbyggs terminologi er capping *tildekking av forurensete masser med et medium som hindrer forurensninger i å lekke ut til omgivelsene*. Capping er med andre ord ikke bare tildekking av forurensninger med et impermeabelt materiale for å hindre vanninntrenging, men kan også være dekking av forurensninger med et materiale som påvirker lekkasjevannets kjemi slik at uønskede stoffer ikke løses ut. I disse tilfellene benyttes ofte betegnelsen *reaktiv capping*.

Forsvarsbygg Utvikling har benyttet reaktiv capping med olivin som hovedingrediens i stor stil i Hjerkin skytefelt, og har også deltatt aktivt i utvikling av olivinbasert cappingmateriale til dekking av elvedeponier og sjøbunn. På Hjerkin er deponiene for tungmetallholdig materiale på Storranden cappet med et kombinasjonsprodukt av olivin og kalsiumbentonitt som både tetter og hindrer utløsning av tungmetaller. På HFK-sletta er det benyttet ren Blueguard 63 som binder tungmetallene i overflatesjiktet og hindrer utlekking i underliggende sedimenter. Prosjektene og resultatene er beskrevet i et senere avsnitt.

ADSORPSJONSKAPASITET

Som det fremgår av foregående avsnitt er olivin en sorbent som kan fjerne tungmetaller fra forurenset vann ved adsorpsjon eller kjemisorpsjon. En viktig forutsetning for bruk av mineralet som rensedium er ikke bare renseevnen, men også at den totale adsorpsjonskapasiteten er stor og at restkonsentrasjonen i vannet etter rensing er på et tilfredsstillende nivå.

Adsorpsjonskapasiteten for tungmetaller defineres som *den maksimale mengde metaller en sorbent kan binde ved gitte forutsetninger*. Adsorpsjonskapasiteten er forskjellig for de ulike metallene og kan variere med hvilke kombinasjoner av metaller som finnes i løsningen. Også metallenes plassering i spenningsrekken har betydning.

Adsorpsjonskapasiteten for et bestemt metall er ingen konstant, men avhenger av flere forhold som den totale metallkonsentrasjon i vannet, forekomsten av konkurrerende ioner og kompleksdannende agenser, spesifikk overflate osv. Hvis sorbenten er et filtermedium for rensing av forurenset vann, er vannets kjemi av særlig stor betydning for hvor store mengder tungmetaller filteret kan binde. Også tilstedeværelsen av organiske syrer vil påvirke kapasiteten sterkt.

Sorbenter som blandes inn i et forurenset materiale blir påvirket både av de fysiske og de kjemiske egenskapene til det forurensete materialet. Særlig innholdet av organisk materiale har stor betydning for effekten av innblanding, og kan i verste fall medføre at lekkasjen av metallene øker i stedet for å reduseres. Negativ adsorpsjonskapasitet er bl.a. registrert ved innblanding av Blueguard 63 i forurenset jord med høyt humusinnhold fra Haukberget i Hjerkin skytefelt. Også forsøk gjennomført ved FFI har vist negativ adsorpsjonskapasitet for olivin¹⁹.

¹⁹ A. E. Strømseng, M. Ljønes, E. Mariussen 2010: Testing av jordforbedringsmidler for stabilisering av tungmetaller i jord. FFI-rapport 2010/00696.

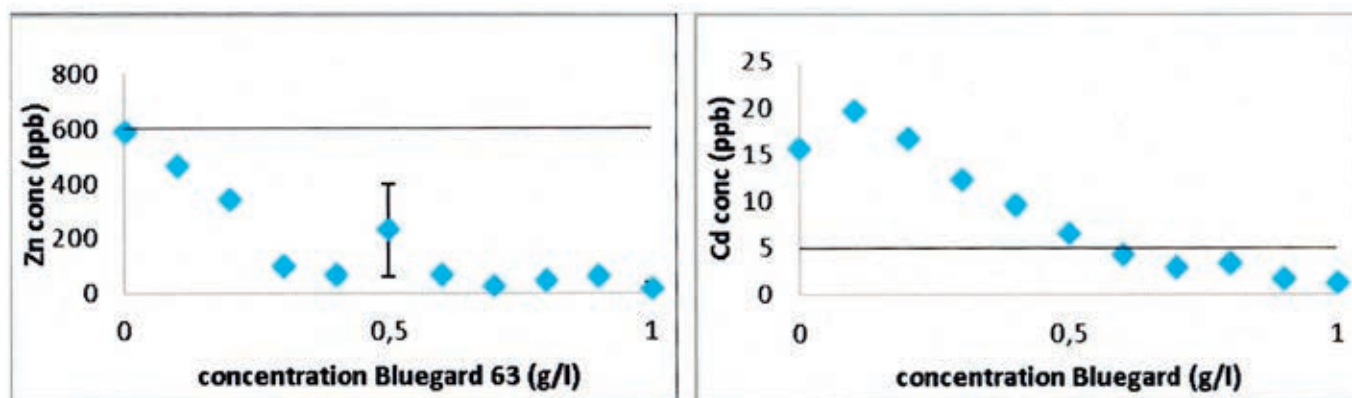


Fig. 11. Tilbakeholdelsen av sink og kadmium som funksjon av olivinkonsentrasjonen i prosessvann fra Sibelco Belgia. Ved en Blueguardkonsentrasjon på 0,5 g/l er ca. 98 % av all sink adsorbert i filtermediet. Tilsvarende verdi for kadmium er 85 % med en Blueguardkonsentrasjon på 0,6 g/l. (Etter C Block et.al.)²⁰

Adsorpsjonskapasiteten for en sorbent bestemmes vanligvis i adsorpsjonsisotemer etter Freundlich (fysiosorpsjon) eller Langmuir (kjemisorpsjon). For Freundlichs adsorpsjonsisotemer benyttes ligningen $Q_e = kC_e^{(1/n)}$ hvor Q_e er den adsorberte mengde (mg/g) pr gram sorbent ved likevekt, C_e er restkonsentrasjonen (mg/l) i løsningen ved likevekt og k og n er konstanter. Langmuirs isotemer beskrives etter ligningen $Q_e = \frac{Q_{\max} b C_e}{1 + b C_e}$ hvor Q_e er adsorbert mengde (mg/g) ved likevekt, $Q_{\max}$ (mg/g) er maksimal adsorpsjonskapasitet, b er en konstant og C_e restkonsentrasjonen i løsningen ved likevekt.

Pr. i dag foreligger det begrenset dokumentasjon på adsorpsjonskapasiteten for olivinprodukter. For bruken av olivin i Hjerkinns skytefelt og RØ er det særlig adsorpsjonskapasiteten for kobber og sink som er interessant. For disse metallene finnes det enkelte relevante analyser. KU Leuven - Dept. Chemical Engineering i Belgia har f.eks. vurdert kapasiteten for Blueguard 63 for sink- og kadmiumholdig vann fra Sibelcos kvartsgrove i Lommel. Eksempler fra disse forsøkene er vist i fig. 11.

Figuren viser at bindingspotensialet for sink i forsøkene er ca. 1,1 g/kg Blueguard og 30 mg/kg Blueguard for kadmium med den vannkvaliteten som er brukt ved forsøkene. Resultatet er vesentlig dårligere enn det Forsvarsbygg Utvikling fant ved XRF-målinger på delvis tungmetallmettet, olivinbasert filtermateriale fra Hjerkinns. XRF-prøvene ble tatt fra et kontaktfilter for rensing av avløpsvann fra Tverrfjellet gruver. Målingene viste at 6,7 g kobber og 5,5 g sink var bundet pr. kg filtermateriale. Andre undersøkelser som ble gjort ved Tverrfjellet gruver viste at 1,4 g kobber og 0,7 g sink var bundet pr kg

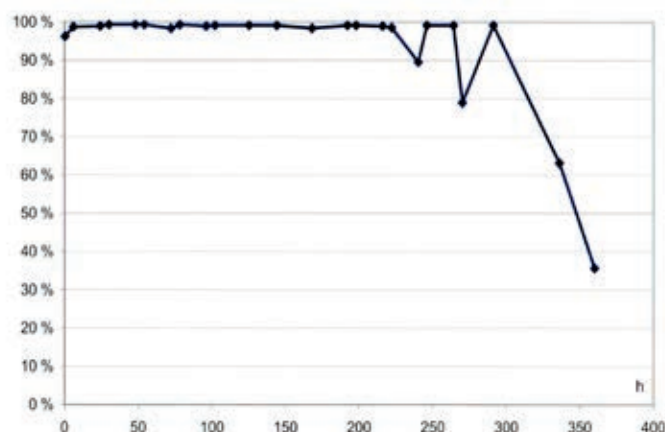


Fig. 12. Bindingskurven for kobber i Blueguard olivinegranulat som funksjon av belastningstid. Belastningstiden er et uttrykk for vannmengden som går gjennom filteret. Testen er utført ved Sibelcos laboratorium på Åheim. (Etter SteinarSlagnes).

filtermateriale. Det understrekes at filteret i det siste tilfellet ikke var mettet og at verdiene derfor ikke representerer den totale adsorpsjonskapasiteten.

For kobber er det gjennomført adsorpsjonsstudier bl.a. ved NTNU hvor konklusjonen er at: «The olivine process dust is capable of retaining significant amounts of copper, even when exposed to relatively high initial copper concentrations»²¹. Undersøkelsen viser også hvilken betydning pH har for retensjonen av kobber.

Ved Sibelcos laboratorium i Åheim ble det gjennomført en kolonnetest for å klarlegge bindingspotensialet for kobber i Blueguard olivinegranulat. Resultatet av testen er vist i fig. 12

Figuren viser at i løpet av de første 300 timene adsorberer granulatet i kolonnene mer enn 99% av kobberio-

²⁰ C. Block et al 2013.: Waste water treatment Maatheid Lommel (Belgium). KU Leuven – Dept. Chemical Engineering.

²¹ R.A. Kleiv, K.L. Sandvik 2002: Modelling copper adsorption on olivine process dust using a simple linear, multivariable regression model. Mineral Engineering 15.

nene. Adsorpsjonen skjer svært raskt. Laboratoriet opplyser at det er tilstrekkelig med bare noen få sekunders oppholdstid for å få full adsorpsjon.

Etter 300 timer faller adsorpsjonen dramatisk. På dette tidspunktet var det bundet 8,23 kg kobber pr tonn granulat. Dette var lavere enn forventet, og kan ha sammenheng med at den interne permeabiliteten i granulatet er så lav at det kun er de ytre lagene av hver enkelt granul som adsorberer.

Det pågår også adsorpsjonsforsøk med kobber i forbindelse med bruk av Blueguard 63 som rensemedium for tungmetallholdig avrenning fra Løkken og Folldal gruver. Forsøkene gjennomføres ved et samarbeid mellom Forsvarsbygg Utvikling og Cowi AS. Resultatene så langt er positive.

Som det fremgår av dokumentasjonen over er bindingspotensialet for kobber og sink varierende. Forsvarsbygg Utvikling har også gjennomført forsøk som viser adsorpsjonspotensialet for olivin med andre tungmetaller. Også disse forsøkene viser varierende resultater. Årsaken kan sannsynligvis tilskrives forskjeller i kvaliteten på det vannet som er brukt i testene. Avløpsvannet fra Tverrfjellet gruver og Hjerkinns skytefelt, som ikke inneholder organisk forbindelser av betydning, synes å ha en spesielt gunstig sammensetning for sorpsjon til olivin. De dårligste resultatene har en fått der vannet har høyt innhold av humussyrer. Dette tilsier at olivin kan være dårlig egnet som bindingsmedium for tungmetaller i skytefelt med stor andel av myr og forsumpet skogsmark. Det må igjen understrekes at olivin eller andre sorbenter må testes under realistiske feltforhold før de benyttes i stort omfang for løsning av avrenningsproblemer.

STABILITET MOT LEKKASJE

En viktig egenskap ved et filtermedium er hvor sterkt tungmetallene bindes i mediet og hvor lett de løses ved ytre påvirkning. Dette betegnes *stabilitet mot lekkasje*. Stabiliteten påvirkes av en rekke faktorer og er bl.a. en funksjon av bindingsformen og tilgangen på konkurrerende metaller. Vanligvis regnes kjemisorpsjon, også kalt *mineralisering*, som den mest stabile bindingsformen.

I Forsvarsbyggs prosjekter både på Hjerkinns og i RØ har stabiliteten mot lekkasje vært en svært viktig faktor ved valg av sorbent. Mange sorbenter, spesielt organiske som torv- og beinprodukter, har høy adsorpsjonskapa-

sitet, men påvirkes lett av ytre faktorer som forvitring, bakteriell nedbrytning, pH-endring, frost, varme, klimaeendringer etc.²² Dette er lite tilfredsstillende når målet er å sikre forurensingene mot lekkasje i all fremtid. For Forsvarsbygg Utvikling har det derfor vært en forutsetning at sorbentene skal være stabile og fortrinnsvis være en variant hvor tungmetallene mineraliseres eller danner stabile, kjemiske forbindelser.

For å få et objektivt bilde av olivins stabilitet mot lekkasje av tungmetaller ble mettet olivgranulat av den typen som er benyttet på Hjerkinns og i RØ testet ved Molab AS. Det ble utført ristetest for kobber, sink og krom i henhold til EN-12457-E med L/S = 10 og kolonnetest i henhold til CEN/TS 14405. Krom er tatt med fordi det første olivgranulatet Sibelco produserte var kromholdig. De nye produktene er imidlertid kromfrie. Resultatet av testene er vist i fig. 13. Som det fremgår av figuren er stabiliteten meget god, og materialet tilfredsstiller grenseverdien for inert avfall med god margin. Også undersøkelser gjort ved NTNU²³ bekrefter dette og viser i tillegg at stabiliteten er god ved pH helt ned til < 5. I praksis tilsier dette at olivinprodukter mettet med tungmetaller ikke får status som farlig avfall, men kan legges på vanlige avfallsfyllinger.

OPPHOLDSTID

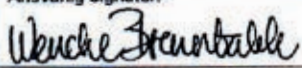
Med nødvendig oppholdstid menes *hvor lang kontakttid som kreves mellom det forurensede vannet og sorbenten for å oppnå ønsket rensegrad*. Oppholdstiden er en viktig parameter i renseprosessen da den påvirker både filterets størrelse og akseptabel strømningshastighet over eller i filtermediet. Den ideelle sorbenten fungerer effektivt ved kort oppholdstid. Enkelte studier kan imidlertid tyde på at det er en negativ sammenheng mellom oppholdstid og stabiliteten i bindingene.²⁴ Rask binding kan gi liten stabilitet fordi bindingsplassene som sitter lett tilgjengelig og utsatt til på filterflatene utnyttes først. Også bindingen i ustabile hydroksider kan skje meget raskt. Ved lang oppholdstid er mulighetene for kjemisorpsjon og mineralisering større. Kjemisorpsjon er ansett å gi sterkere bindinger enn fysisk adsorpsjon til mineraloverflatene.

Oppholdstiden er temperaturavhengig. Ved høy temperatur er vannets viskositet mindre og vannets evne til å penetrere de lavpermeable delene av filteret øker. Derved øker også antallet tilgjengelige bindingsplasser innen-

²² I. Haugsgjerd 2010: Reinsing av Kopar i sur gruveavrenning (AMD) med algeaktivert granulert torv som sorbent. UMB, Institutt for plante- og miljøvitenskap. 2010.

²³ R. A. Kleiv 2010: Heavy metal adsorption on silicate tailings. NTNU Dept. of Geology and Mineral Resources Engineering.

²⁴ R. Olafsen 1996: Rensing av tungmetall- og oljeforurensat avløpsvann i bark/lettklinkerfilter. Hovedoppgave ved fakultetet for geofag og petroleumsteknologi, NTNU.

 Molab as Din Labpartner		Molab as, 8607 Mo i Rana Telefon: 75 13 63 50 Besøksadr. Mo i Rana: Mo Industripark Besøksadr. Oslo: Kjelsåsveien 174 Besøksadr. Glomfjord: Ørnesveien 3 Besøksadr. Porsgrunn: Herøya Forskningspark B92 Organisasjonsnr.: NO 953 018 144 MVA	
Kunde: NORTH CAPE MINERALS Att: Øystein Wærnes ÅHEIM 6146 ÅHEIM		RAPPORT Utlekkingstester – Granulat Hjerkin	
		Ordre nr.: 36632	Antall sider + bilag: 2
		Rapport referanse: KR-08881	Dato: 23.12.2009
Rev. nr. 0	Kundens bestillingsnr./ ref.:	Utført: W.Brennbakk/T.Pedersen	Ansvarlig signatur: 

Prøver mottatt dato: 11.12.2009

FREMGANGSMÅTE

Det er utført ristetest i henhold til EN-12457-2 med L/S=10 og kolonnetest i henhold til CEN/TS 14405 med uttak av C₀. Testene er utført med bruk av ionebyttet vann, og eluatene er analysert med hensyn på innhold av Cu, Cr og Zn.

RESULTATER

Prøve merket:			Ristetest: Granulat 1 Motstrøms- filter senter- kanal	Kolonnetest: Granulat 1 Motstrøms- filter senterkanal	Ristetest: Granulat 2 Kontakt- filter Topp	Kolonne- test: Granulat 2 Kontakt- filter Topp	Grense- verdi Inert avfall
Parameter	Enhet	Ana.dato	KA-040793	KA-040794	KA-040963	KA-040964	
Cu, Kobber	mg/kg	23.12.09	0,2		0,2		2
Cr, Krom	mg/kg	23.12.09	< 0,05		< 0,05		0,5
Zn, Sink	mg/kg	23.12.09	0,2		0,1		4
Cu, Kobber	mg/l	23.12.09		0,030		0,040	0,6
Cr, Krom	mg/l	23.12.09		0,016		< 0,001	0,1
Zn, Sink	mg/l	23.12.09		0,080		0,040	1,2

ANMERKNINGER

Analyseresultatene er sammenlignet med grenseverdiene for inert avfall både for ristetest og kolonnetest. Ingen av de målte verdiene overskrider grenseverdien.

Fig. 13. Resultater av stabilitetstest på olivingranulat mettet med tungmetaller. Prøvene er tatt fra et kontaktfilter ved Tverrfjellet gruver på Hjerkin.

for en gitt tidsramme. Dette er bl.a. godt dokumentert i adsorpsjonsforsøk med olivingranulat utført på varmt, tungmetallholdig kjølevann fra messingstøperiet ved Raufoss Metall.²⁵

Flere av forsøkene Forsvarsbygg Utvikling har gjennomført med olivinprodukter viser at maksimal bindingseffekt oppnås etter forholdsvis kort tid uten at dette går ut over stabiliteten. Ved Raufoss metall ble det oppnådd over 95 % tilbakeholdelse av de sentrale tungmetaller ved 8 minutters oppholdstid.

På det første kontaktfilteret som ble bygget i RØ ble god effekt oppnådd selv om oppholdstiden var svært kort (sannsynligvis < 1 minutt). Også forsøkene med avløpsvann fra Tverrfjellet gruver på Hjerkin indikerer at nødvendig oppholdstid er kort for å oppnå tilfredsstillende renseeffekt og stabilitet.²⁶

Oppholdstiden har ikke vært spesifikt tema ved det store flertall av forsøk som er gjort med olivin som rensemiddel. Det er derfor få konkrete holdepunkter for anbefalinger om optimal oppholdstid.

²⁵ T. Østeraas 2010: Binding av tungmetaller i olivingranulat ved Raufoss Metall. Oppdragsrapport.

²⁶ T. Østeraas 2010: Forsøk med Blueguard olivingranulat som rensemiddel for tungmetallholdig avrenning fra Tverrfjellet gruver. Fagrapport Forsvarsbygg utvikling.

I Forsvarsbyggs dimensjonering av filteranlegg har en valgt å benytte 20 – 30 minutter som veiledende størrelse. Ved vinterdrift, med høy viskositet i vannet bør oppholdstiden økes.

HMS

Ved bruk av knuste, mineralske produkter foreligger det alltid fare for inhalering av støv. Støvet kan gi alvorlige helseskader som silikose og lungekreft. Dette har vært et særlig aktuelt tema ved spredning av Blueguard 63 fra helikopter i Hjerkinns skytefelt hvor bakkemannskapet er kontinuerlig eksponert for olivinstøv. Fokus er i første rekke rettet mot støvets potensielle innhold av asbest, kvarts og nikkel etter som de fleste olivinforekomstene inneholder disse stoffene. Som det fremgår av tidligere avsnitt inneholder imidlertid olivin fra Åheim ikke asbest og kvarts som kan gi silikose eller kreft. Mineralet inneholder imidlertid 0,3 % nikkeloksid (NiO). Som påpekt tidligere kan kontakt med metallisk nikkel eller inhalering av nikkel gi allergier og kreft.

Mineralogisk – geologisk museum ved universitetet i Oslo har utarbeidet et dokument om faren for helsemessige skader forårsaket av nikkel fra Åheimolivin.²⁷ I dokumentet påpekes det at nikkel i olivin er meget sterkt bundet i mineralets silikatstruktur hvor hver Si-O-binding har en styrke på 464 kJ/mol og hvor mineralet

er stabilt selv under de ekstreme temperaturer og trykk som eksisterer i jordens mantel. De kjemiske bindingene mellom atomene i olivin er så sterke at nikkel ikke vil være biologisk tilgjengelig. Åheimolivinen er derfor friskmeldt som kilde for nikkelbasert kreft eller allergier.

Selv om olivinen fra Åheim ikke inneholder kvarts, asbest eller løselig nikkel bør det brukes støvmasker ved arbeidsoperasjoner hvor luftens innhold av olivinstøv er stort. Mineralstøv i lungene øker faren for luftveisinfeksjoner selv om støvet ikke er giftig.

BLUEGUARDPRODUKTER SOM ER BENYTTET AV FORSVARSBYGG UTVIKLING

Det klart viktigste olivinproduktet som er benyttet både på Hjerkinns og i RØ er Blueguard 63 – olivinpulver uten noen form for tilsetning. Produktet er sertifisert etter kravene i NS-EN ISO 9001:2008 og leveres i bulk eller storsekk med svært ensartet kvalitet. Bulkvekten er ca. 1,65 tonn/m³. pH ligger mellom 8,9 og 9,5.

Som nevnt i et tidligere avsnitt har Blueguard 63 svært lav permeabilitet ($k = 5,51 \text{ m/år}$). Dette begrenser bruken av produktet i bl.a. perkolasjonsfiltere. For å bøte på problemet har Sibelco i samarbeid med Forsvarsbygg utviklet granulater hvor det reaktive



Fig. 14. Bakkemannskapet utsettes for kontinuerlig støveksponering ved helikopterspredning. Forsvarsbygg Utvikling har strenge krav til bruk av sikkerhetsutstyr som bl.a. støvmasker og vernebriller for å unngå at støvet inhaleres eller kommer i kontakt med øynene. Bildet over viser hva bakkemannskapet utsettes for ved spredning av kalk eller olivin når verneutstyr ikke benyttes.



Fig. 15. Olivingranulat av den typen som er brukt på Hjerkinns.

²⁷ T. V. Segalstad 1997: Nikkel i olivin. Rapport Mineralogisk – geologisk museum UiO.

materialet er Blueguard 63. Ved granuleringen kan kornstørrelsen og permeabiliteten velges fritt avhengig av hva produktet skal brukes til. En har også muligheter for å tilsette andre reaktive komponenter som f.eks. aktivt kull for å binde klorerte, organiske forbindelser eller jernsalter for å binde antimon. Det er også utviklet spesielle cappinggranulater som kombinerer reaktiv olivin med bentonitt i ett og samme produkt.

Det første granulatet som ble produsert for Forsvarsbygg Utvikling hadde en kjerne av massiv olivin med Portlandsement som viktigste bindemiddel for olivinpulveret. Produktet fungerte effektivt som adsorpsjonsmedium for tungmetaller, men på grunn av den inaktive kjernen var den totale adsorpsjonskapasiteten lav i forhold til volumet. Portlandsement inneholder dessuten krom som kan lekket ut i eluatet. Det var derfor ikke uvanlig at kromverdiene var høyere i utløpsvannet enn i innløpsvannet i et filteranlegg hvor denne type granulat var benyttet. Dette var bl.a. tilfelle for forsøksanleggene på Hjerkin og i RØ. Det må for øvrig anmerkes at all sement er avkromatisert, dvs. at den ikke inneholder heksavalent krom (Cr^6) som er meget giftig og kreftfremkallende. De høye kromverdiene i utløpsvannet har

derfor mer psykologisk enn medisinsk interesse.

I visse tilfeller kan krom passiviseres ved at løst nikkel fra olivinet sammen med oksygen danner nikkelkromat (NiCr_2O_4) som ikke er giftig.

I tillegg til økte kromverdier var pH på utvannet svært høy den første tiden etter at et filteranlegg var satt i drift. Også dette skyldtes overskuddssement i bindemidlet. Etter hvert som den frie sementen ble vasket ut, avtok imidlertid pH ned mot normalverdien for olivin.

På grunn av de åpenbare svakhetene med de første granulatproduktene ble produksjonsteknikken lagt om og kromfrie bindingsmidler erstattet Portlandsementen. Den mekaniske styrken er vesentlig bedre enn på det gamle granulatet, og innholdet av overskuddssement er sterkt redusert. Granulatet har betegnelsen *Blueguard G 1-3*.

En viktig egenskap ved granulatet er dets interne permeabilitet, det vil si muligheten vannet har for å perkolere gjennom granulatsubstansen. Jo høyere den interne permeabiliteten er desto større bindingskapasitet kan oppnås fordi den totale, tilgjengelige reaksjonsflaten øker.

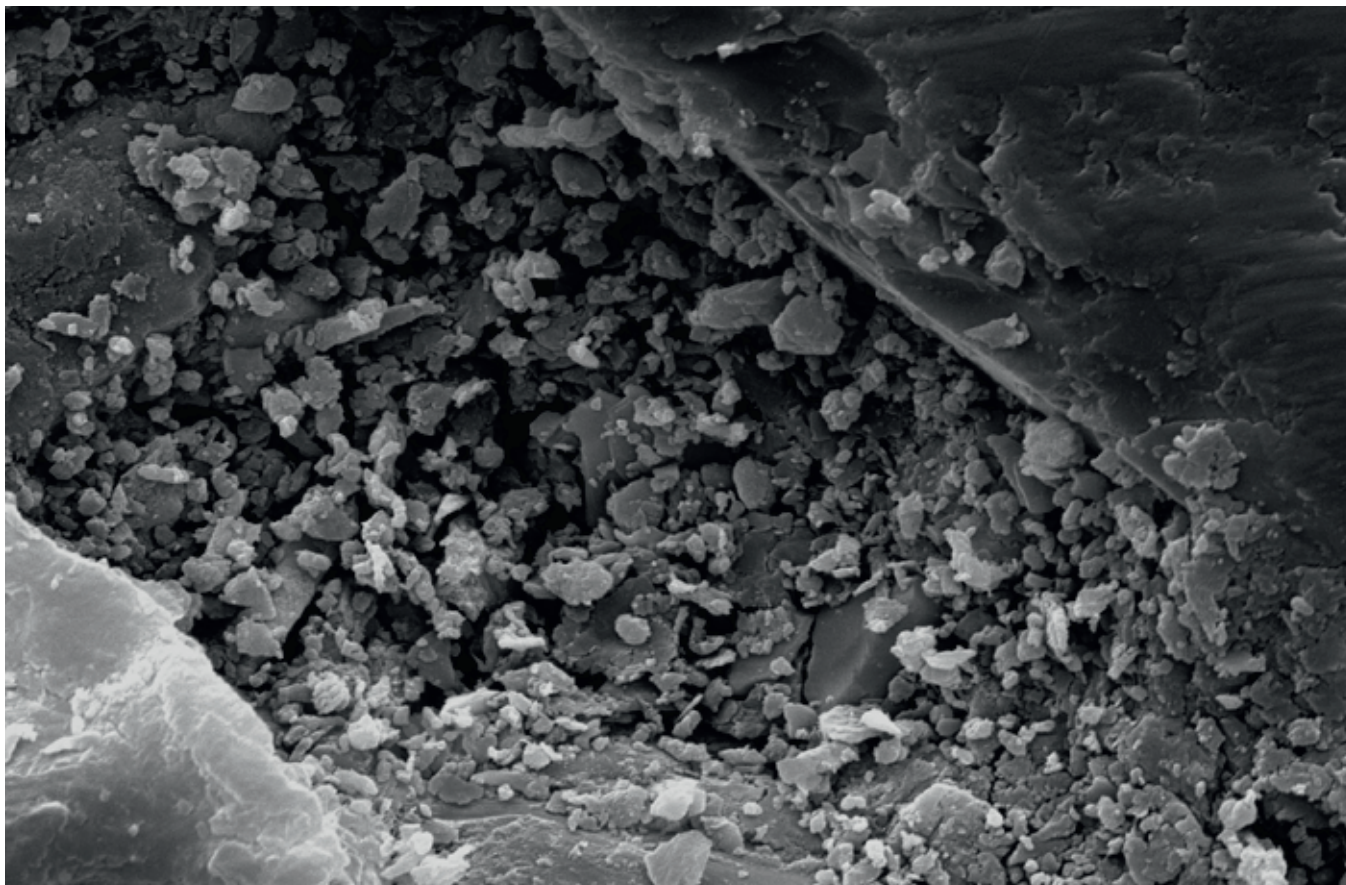


Fig. 16. Elektronmikroskopibilde av olivingranulat med 5 000 X forstørrelse. Bildet viser den åpne strukturen i granulatet. Den store spesifikke overflaten gir høy bindingskapasitet for tungmetaller. (Etter Steinar Slagnes).

Kolorimetrisk test utført ved Sibelcos laboratorium i Åheim²⁸ viser at Blueguard G 1-3 som leveres til Forsvarsbygg har høy intern permeabilitet uten at dette kan dokumenteres tallmessig.

Foreløpig er det kun Blueguard 63 og Blueguard G 1-3 som er brukt som rensemedium i fullskalaanlegg i RØ og på Hjerkin. Et nytt produkt som har

betegnelsen *Blueguard renseblokk* er klar for utprøving i et renseanlegg ved HFK-sletta på Hjerkin. Blokkene produseres etter samme lest som vanlige Lecablokker med Blueguard G 1-3 som reaktivt materiale. De foreløpige testene indikerer at renseblokkene er velegnet for bruk i kontaktfiltere.



Fig. 17. Renseblokk med olivingranulat som reaktivt medium. Blokkene er erosjonsbestandige og har høy permeabilitet. Produktet vurderes som spesielt godt egnet i kontaktfiltere.

²⁸ Muntlig opplysning fra Steinar Slagnes

DEKK-KLIPP

Dekk-klipp er fremstilt ved kverning av brukte bildekk. De vanligste klipp typene er såkalt *enkeltklipp* som har gått gjennom klippemaskinen én gang, og *multiklipp* eller *finlipp* som er klippet to eller flere ganger. Forsvarsbygg Utvikling har i sine forsøk og fullskala anlegg benyttet både enkeltklipp og multiklipp.

Flakstørrelse eller kornstørrelsen for dekk-klippet er en funksjon av antall ganger dekkbitene har gått gjennom klippemaskinen. Med flakstørrelse menes *diameteren på hver gummibit etter klipping*. Enkeltklippet har flakstørrelse på opp til 200 mm og innholdet av fine gummi-partikler er lite. For multiklipp varierer flakstørrelsen med antall klippinger, og er for det klippet Forsvarsbygg Utvikling har brukt i størrelsesorden 20 - 30 mm. Innholdet av finpartikler er vesentlig høyere enn i enkeltklipp hvilket reduserer porevolumet og permeabiliteten, men øker den totale overflaten pr volumenhet. Dette er viktig hvis klippet skal brukes som rensemedium. En negativ effekt av redusert flakstørrelse er imidlertid at lekkasjen av miljøgifter fra klippet øker.

Dekk-klipp er et billig materiale som er tilgjengelig i store volumer. Materialet er også lett å arbeide med og er ekstremt stabilt mot mekaniske påkjenninger. Til tross for dette har dekk-klipp i liten grad blitt utnyttet som ressurs i Norge bortsett fra som energikilde i sementindustrien. Dette tilskrives i første rekke miljøvernmyndighetenes restriktive holdning til gjenbruk av dekk gitt gjennom avfallsforskriftens kap. 5: "*Innsamling og gjenvinning av kasserte dekk*"²⁹. Forskriften gjør det bl.a. vanskelig å bruke dekk-klipp i anleggssammenheng og som rensemedium for forurenset vann. I løpet av 2013 ble det lempet noe på restriksjonene, bl.a. ved at Fylkesmennene er gitt vedtaksfullmakt for prosjekter hvor dekk-klipp inngår som en aktiv bestanddel. I prinsippet er det nå åpnet for bruk av dekk-klipp bl.a. i skytevoller, men i hvert enkelt tilfelle må saken vurderes og godkjennes av Fylkesmannen.³⁰

DEKK-KLIPPETS FYSISKE EGENSKAPER

Hovedbestanddelene i dekk-klipp er syntetisk gummi, stålcord og syntetisk tekstil. I moderne personbildekk

utgjør gummiblandinger ca. 82,5 % av dekket, stålcord og kanttråd ca. 12,5 % og tekstiler ca. 5 %. Gummien i dekk-klipp er svært seig og bestandig og tåler mekanisk påkjenning meget godt. Porevolumet i enkeltklipp kan være over 60 %, mens det i multiklipp ligger i området 40 – 50 %.

Dekk-klipp lar seg ikke komprimere. Ved påføring av last presses gummiflakene sammen og porevolumet reduseres, men så snart lasten fjernes fjærer gummien tilbake og det opprinnelige porevolumet gjenopprettes. Dekk-klipp har stor indre friksjon med en rasvinkel på nærmere 90°, hvilket gir meget høy stabilitet mot erosjon. Dette er en viktig egenskap ved bruk av dekk-klipp i skytevoller.

Gummien i dekk-klipp har lav porøsitet og liten evne til å holde på vann. Tekstilene som er vevet inn i gummien er imidlertid porøse og kan suge noe vann. Lavt vanninnhold gir dekk-klippet gode bruksegenskaper i frost. I skytevoller blir f.eks. minerogene vollmasser svært ofte hard som betong i kulde, mens dekk-klippet forblir mykt. Ved hard overflate øker både rikosjettfrekvensen og fragmentering av prosjektilene.

I noen få tilfeller har dekk-klippet tatt fyr i skytevoller når det benyttes sporlyssammisjon. Tester utført på materiale fra bane 2 i Rena leir viser at selve gummimassen ikke lar seg antenne med vanlig sporlysskyting da antennelsestemperaturen er på hele 340°C. Derimot er tekstilene lettantennelige. Brennende tekstiler kan gi så høy temperatur at også gummien tar fyr. Problemet er kun registrert for voller under tak hvor tekstilene og pulverisert gummi kan bli meget tørre. Brannen på bane 3 i Rena leir høsten 2013 antas å skyldes antennelse av tekstiler og gummistøv ved sporlysskyting.

DEKK-KLIPPETS MILJØEGENSKAPER

I litteraturen er det referert en rekke undersøkelser hvor formålet har vært å klarlegge om det finnes stoffer i dekk-klipp som kan medføre skader på miljøet og under hvilke forhold eventuelle miljøskadelige stoffer lekker ut.³¹

²⁹ Miljøverndepartementet 2004: Forskrift om gjenvinning og behandling av avfall.

³⁰ Brev fra Miljødirektoratet til Ragn Sells datert 21.10.2013

³¹ Se f. eks. Håøya A. O. & Unsgård G. T. 2004: Miljøovervåkning 2001 – 2003. Avrenning fra kvernet bildekk.Scandiaconsult AS. Rapporten inneholder i alt ca. 50 referanser og litteraturreferanser.



Fig. 18. Dekk-klipp kan ha svært forskjellig kornstørrelse eller flakstørrelse. Den mørke massen til venstre i bildet er finmalt gummi hvor corden er fjernet. Haugen til høyre er et dobbeltklipp, dvs. at dekkene er klippet 2 ganger.



Fig. 19. Fra Ragn-Sells lager for dekkklipp på Skjerkøya ved Langesundsfjorden. I haugen til venstre ligger dekk som er klippet 2 ganger (multi-klipp), mens haugen til høyre inneholder enkeltklipp. Legg merke til multiklippets rasvinkel som er tilnærmet 90° .

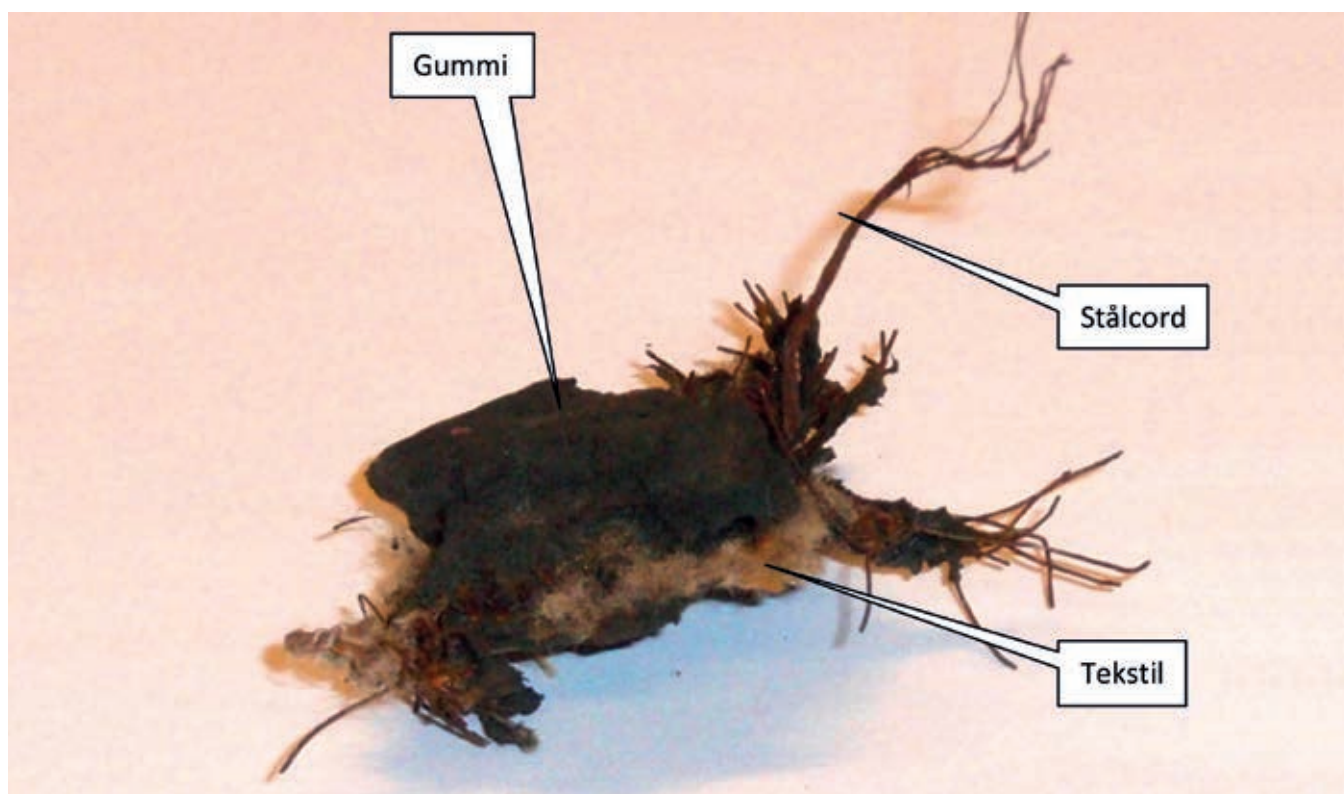


Fig 20. Bit av dekk-klipp som viser hovedbestanddelene: Gummi, stålcord og tekstil.



Fig. 21. Brann i dekk-klippet i fangvollen på bane 3 i Rena leir høsten 2013. Årsaken til brannen var sannsynligvis antennelse av tekstiler og gummistøv i dekk-klippet etter skyting med sporlysprosjektiler. (Foto Geir Olsen).

Tekstilene som brukes i dekk består av syntetiske fibre og vev som i kjemisk henseende ikke avviker fra andre syntetiske stoffer som er i allmenn bruk. Eventuelle miljøskadelige stoffer er derfor neppe assosiert til tekstilene unntatt ved brann hvor en ikke kan utelukke at det forekommer uønskede stoffer i røykgassene.

Cord og kantråd er jernlegeringer som kan gi opphav til rust og jernutfellinger. Jern er ikke klassifisert som miljøgift og anses derfor som uproblematisk i miljøsammenheng. Tvert i mot kan oksider av jern ha en positiv miljøeffekt ved at de binder enkelte tungmetaller.

Det største potensialet for miljøskadelige stoffer finnes i gummiblandingen som brukes i bildekkene. Miljøegenskapene for de fleste av disse stoffene er godt kjent, men det kan ikke utelukkes at dekkprodusentene benytter ukjente tilsetningsstoffer for å gi dekkene spesielle egenskaper. Slike stoffer er det vanskelig å ha full kontroll med. Gummiblandingen som brukes i standard personbildekk oppgis å inneholder følgende stoffer:

Naturgummi og syntetisk gummi	40 - 60 %
Mykgjørere (oljebaserte)	25 - 30 %
Forsterkningsmidler	25 - 35 %
Aktivatører (vanligvis sinkbaserte)	2 - 5 %
Vulkaniseringsmidler (svovelbaserte)	1 - 2 %
Akseleratører	0,5 - 2 %
Antialdringsmidler	1 - 2 %
Harts	0 - 3 %
Andre tilsetningsstoffer	< 1 %

Gummien i dekk-klipp består av en blanding av forskjellige typer gummimateriale. Gummien holdes sammen med svovelbindinger som dannes i vulkaniseringsprosessen. Kjemisk nedbrytning av gummien skjer når svovelbindingene oksideres. For å hindre nedbrytningen tilsettes gummien antioksidanter. Svenske undersøkelser viser at nedbrytningen av eksponert gummi tilsvarende ca. 1,25 µm pr år, dvs. ca. 1,25 mm av overflatesjiktet i løpet av 1000 år.³² Gummien må derfor betraktes som ekstremt stabil og aldri bestandig så lenge den ikke utsettes for helt spesiell kjemisk påvirkning.

Utlakingsforsøk ved normal pH som er gjort på gummi fra bildekk viser svært lave konsentrasjoner av metaller og uorganiske komponenter.³³ Ved bruk av testvann med lavere pH enn 3,5 øker imidlertid utlakingen av visse metaller noe (Ba, Zn, Cr, Pb, Se). Også ved eksponering

for organiske løsningsmidler som bensin og diesel øker lekkasjen.

Forsvarsbygg Utvikling har gjennomført egne utlakingsforsøk (kolonneforsøk) for å få et mål på tungmetall-lekkasjen fra de dekk-klipptypene som er benyttet i RØ og Rena leir.³⁴ Resultatene er vist i tabell 2 nedenfor. Som det fremgår av tabellen er det først og fremst kalsium, jern, svovel og mangan som lekker. Ingen av disse stoffene medfører miljøskader med de konsentrasjonene som ble påvist i forsøkene. Av de uønskede metallene har sink den høyeste konsentrasjonen. Grenseverdien for toksiske effekter på vannlevende organismer (PNEC) for sink er satt til 20 µg/l, mens grenseverdien i drikkevannsnormen er 300 µg/l. Konsentrasjonen i lekkasjevannet fra multiklipp er med andre ord høyere enn ønskelig. For enkeltklipp er sinkkonsentrasjonen i lekkasjevannet lav. I avrenningen fra støyvollen i Råde var f.eks. gjennomsnittlig konsentrasjon 0,61 µg/l med maksimumsverdi på 25,4 µg/l.

Tabell 2. Tungmetallkonsentrasjonen i utlakingsvann fra kolonneforsøk på Rena. Enheten er mg/l.

Parameter	15 min oppholdstid	7 døgns oppholdstid
Magnesium	1.11	1.49
Kalsium	13.7	28.5
Jern	0,333	4.7
Fosfor	<0.04	<0.04
Svovel	2.92	3.49
Aluminium	0,072	0,597
Kobber	0,0098	0,0079
Mangan	0,204	1.36
Sink	0,13	0,0646
Bly	<0.018	<0.018
Kadmium	<0.0012	<0.0012
Nikkel	0,0074	<0.006
Krom	<0.0025	<0.0025
Kobolt	<0.003	<0.003
Molybden	<0.005	<0.005
Arsen	<0.025	<0.025

³² Håøya, A. O. & al. 2008: Gjenbruk av bildekk i geokonstruksjoner. Rambøll oppdragsrapport.

³³ Se f.eks. B. Svedberg & Von Brömsen 2000: Returdækk i mark- og anleggsbygging.

³⁴ T. Østeraas, 2011: Bruk av dekk-klipp i skytevoller og renseanlegg. GjenVinn-prosjektet.

På grunn av sinklekkasjen er multiklipp i utgangspunktet vurdert som uegnet som rensemedium. Flere forsøk viser at denne antagelsen ikke alltid er riktig. Dekk-klipp kan binde sink når innvannets sinkkonsentrasjon er høy. Ved Oppland Metall, hvor Forsvarsbygg Utvikling gjennomførte forsøk med sinkholdig industrivann i et motstrøms perkolasjonsfilter med multiklipp som rensemedium, ble sinkkonsentrasjonen redusert fra 4 300 µg/l til 4,7 µg/l gjennom filteret.³⁵ I et dekk-klippbasseng for rensing av avløpsvann fra en industrifylling i Lier var renseeffekten for sink hele 71,9 % selv etter 10 års drift uten bytte av filtermedium. I Lieranlegget ble det brukt enkeltklipp som rensemedium.

I tillegg til tungmetaller inneholder dekk-klipp også andre stoffer som er klassifisert som miljøgifter. Dette gjelder spesielt høyaromatiske oljer og fenolforbindelser. Selv om de fleste av disse stoffene er sterkt bundet i gummien er myndighetene restriktive når det gjelder å tillate bruk av dekk-klipp i f. eks. renseanlegg med mindre en sluttbehandling som ikke innebærer deponering kan dokumenteres. Av organiske miljøgifter som finnes i dekk-klipp er fokus spesielt rettet mot PAH, PCB, naftalen, pyren, 4-t-oktylfenol, pentaklorfenol og bisfenol-A.

Forekomsten av **PAH** i dekk er knyttet til mykgjørerne som består av høyaromatiske oljer. I gjennomsnitt inneholder gummien ca. 60 mg PAH pr kg tørrvekt. PAH er imidlertid sterkt bundet til det faste materialet (gummien) og lekker under normale omstendigheter ikke ut til omgivelsene. En rekke utlakingsforsøk som er referert i litteraturen viser at konsentrasjonen av PAH i utlakingsvannet er svært lav.³⁶ Ved bruk av destillert vann som utlakingsmiddel ligger konsentrasjonene av kreftfremkallende PAH praktisk talt på deteksjonsgrensen (0,03 µg pr l). Til sammenligning er kravet i drikkevannsnormen 0,2 µg/l. Ved høy pH øker imidlertid utlakingen av PAH noe. For å teste stabiliteten av PAH ved høy pH er det derfor gjort utlakingsforsøk med 1 mol NaOH som utlakingsmiddel. Forsøkene viser at selv med dette midlet overstiger ikke PAH-innholdet 3,5 mg pr l. Sterke organiske løsningsmidler som for eksempel bensin og diesel vil imidlertid medføre en dramatisk økning av utlekket PAH. Også brann gir sterk økning i PAH-utslippet. Dekk-klipp bør derfor ikke benyttes der det er fare for drivstoffsøl som f.eks. ved verkstedsanlegg, oppstillings- og opptankingsplasser for kjøretøyer eller hvor dekk-klippet kan antennes.

PCB har vært i søkelyset spesielt i forbindelse med bruk

av dekk-klipp i veikonstruksjoner. Alle refererte undersøkelser viser imidlertid at lekkasjen av PCB er svært lav selv under ekstreme forhold. En kan derfor ikke se at PCB vil medføre avrenningsproblemer ved den bruk som er aktuell i Forsvaret.

For naftalen, pyren, 4-t-oktylfenol, pentaklorfenol og bisfenol-A har Rambøll AS gjort avrenningsundersøkelser bl.a. i tilknytning til en støyvoll ved E6 i Råde og en travbane i Nannestad.³⁷ Analysene viser at gjennomsnittlig innhold av fenoler ligger i størrelsesorden 0,5 µg/l. I Råde er avrenningen fra støyvollen sammenlignet med avrenningen fra E6. Undersøkelsene viser at lekkasjen av de aktuelle, organiske miljøgifter tidvis overskrider grenseverdien for toksiske effekter på vannlevende organismer (PNEC) både for avrenning fra veien og fra støyvollen. PNEC er satt til 0,33 µg/l. Den kvantitative utlekkingen fra gummiklippet i støyvollen er imidlertid vesentlig mindre enn avrenningen fra veien. Lekkasjevannet fra veien inneholder små gummipartikler som lekker 10 – 1000 ggr mer enn dekk-klipp avhengig av hvilket stoff det analyseres på.

Forsvarsbygg Utvikling har gjennomført omfattende forsøk med fenolavrenning fra dekk-klipp i forbindelse med rensingen av avløpet fra Tverrfjellet gruver på Hjerkin og ved Oppland Metall i Hunndalen. Konsentrasjonene er holdt opp mot grenseverdiene for toksiske effekter (PNEC) for fenoler. I de fleste forsøkene er fenolindeks (det totale innholdet av fenoler) benyttet som analyseparameter. PNEC finnes imidlertid ikke for fenolindeks, men verdien på 0,33 µg/l kan sannsynligvis brukes. Ved Oppland Metall er høyeste verdi for fenolindeks for multiklipp målt til 41 µg/l, mens tilsvarende verdier i Tverrfjellet gruver er 38 µg/l. For enkeltklipp er det på Hjerkin målt verdier på opp til 1,6 µg/l. Med andre ord overskrider fenollekkasjen fra multiklipp i verste fall PNEC med en faktor på 100. Gjennomsnittsverdiene er imidlertid vesentlig lavere. Rambølls undersøkelser viser dessuten at fenolene brytes raskt ned til enklere forbindelser i fordøringsdammer med oksygenrikt vann. Dette åpner for enkle renseløsninger for fenolholdig avrenning fra dekk-klippanlegg i Forsvaret.

I tillegg til eventuelle utslipp av miljøskadelige stoffer kan bruk av dekk-klipp medføre en visuell forurensning, spesielt i forbindelse med transport og utlegging. Gummiflakene henger seg lett fast i belter, hjul og drivverk på kjøretøyer og trekkes med til områder hvor de ikke hører hjemme. Spesielle forholdsregler må derfor tas slik at forsøpling unngås.

³⁵ T. Østeraas, 2011 :Bruk av dekk-klipp i skytevoller og renseanlegg. GjenVinn-prosjektet.

BENTONITT

Bentonitt, også kalt *svelleleire*, er en fellesbetegnelse for omdannet vulkansk aske hvor *montmorillonitt* er dominerende aktiv substans. Svelleleire referer til bentonittens evne til å svelle ved tilførsel av vann. Svellingen gir en volumøkning på opp til 15 ganger. Ved volumøkningen dannes det en geleaktig barriere med meget lav permeabilitet. Barrieren er selvreparerende, dvs. at den geleaktige massen fyller en oppstått skade og gir en permanent tetting. Bentonittens svelleegenskaper og evnen til å tette mot vanngjennomtrengning er utnyttet i en rekke produkter som f.eks. membraner og granulater.

Forsvarsbygg Utvikling har benyttet både bentonittmembraner og pulverformet bentonitt til tetningsformål på Hjerkin og i Rena leir. To typer bentonitt er kommersielt tilgjengelig, nemlig *natriumbentonitt* og *kalsiumbentonitt*. Forsvarsbygg Utvikling har valgt aktivert kalsiumbentonitt (AC 200) som tetningsmedium for anleggene i Hjerkin skytefelt da dette produktet er relativt billig og fullt ut tilfredsstillende kravet til tetting på deponier.

AC 200 er et kjemisk stabilt, gågrønt til gult pulver med pH 9,0 – 10,5. Bulkvekten er 1,0 – 1,4 g/cm³. De kjemiske og fysiske egenskapene er vist i databladet på neste side.

Ved gjennomfukning kan kalsiumbentonitten betraktes som impermeabel til alle praktiske formål. I kombinasjon med Blueguard 63 viser tester gjennomført ved Hjerkin PROs laboratorium ingen lekkasje gjennom et 1 cm tykt, ferdig svellet bentonittlag med 50 mm vannsøyle. Testen ble kjørt over en periode på 80 døgn.

Det er blitt reist spørsmål om ferdig svellet bentonitt kan miste tetningsegenskapene ved frost. På grunn av høyt vanninnhold i den geleaktige substansen utvides bentonittlaget 5 - 10 % når temperaturen synker under nullpunktet. Dette kan gi frostsprekker som slipper vann gjennom når bentonitten tiner. For å klarlegge om frost kan påvirke bentonittens permeabilitetsegenskaper gjennomførte Forsvarsbygg Utvikling et frost/tineforsøk i kryolaboriet på Hjerkin høsten 2013. En kopi av membranløsningen som er benyttet på deponiene på Storranden ble bygget inn i en testkolonne i laboriet. Membranløsningen besto av 25 mm Blueguard 63 dekket med 10 mm ferdig svellet bentonitt. Over bentonit-

ten ble det lagt et 10 cm tykt lag med stedege masser (sand og grus). Kolonnen ble satt i en klimaboks hvor 3 år med vintertemperatur ned i - 25° og sommertemperatur opp mot + 20° ble simulert. Etter gjennomført forsøk ble kolonnen satt under vann med 50 mm vannsøyle. Ingen lekkasje ble påvist i løpet av de 14 dagene testen varte. Det ble derfor konkludert med at membranløsningen som er benyttet på Storranden ikke påvirkes negativt av frost.

HMS

Selv om innholdet av respirabel kvarts er < 1 % risikerer personer som er eksponert for bentonittstøv over lang tid å få silicose, Det er også indikasjoner på at langvarig innånding av bentonittstøv kan gi lungekreft. Luftveisirritasjon kan oppstå selv etter kort tids eksponering. Forsvarsbygg Utvikling har derfor stilt klare krav om beskyttelse mot respirabelt bentonittstøv for personell som arbeider i eksponerte miljøer, f.eks. ved helikopterspredning av pulverformet bentonitt. Det stilles også krav til bruk av beskyttelsesbriller da bentonittstøv på øynene kan gi varige synsskader.

BENTONITTPRODUKTER SOM ER BENYTTET AV FORSVARSBYGG UTVIKLING

Som avsluttende tetningslag på deponier er det både i RØ og på Hjerkin foreskrevet bruk av *bentonittmembran*. Standardmembranen består av nålefiltet fiberduk med en kjerne av bentonitt. Bentonitten danner en tett barriere når partiklene sveller uten muligheter for å ekspandere fritt.

For de fleste formål er bentonittmembranen en god løsning for å tette mot inntrengning av vann. I enkelte tilfeller, som f.eks. på deponiene på Storranden i Hjerkin skytefelt, er imidlertid de tradisjonelle membranene dårlig egnet på grunn av bratte skråninger og fare for setninger som kan føre til at membranene revner. Tykkelsen på bentonittlaget i membranene er dessuten liten (< 1 cm) noe som gjør den ekstra sårbar. Forsvarsbygg Utvikling har derfor utviklet en ny type tetting som erstatter membranene og som kan benyttes på alle typer overflater uavhengig av skråningsvinkler og setninger. Tetningsmediet er gitt betegnelsen *reaktiv*

Typical Chemical Composition

SiO ₂	50,0 – 60,0 %	MgO	3,0 – 4,0 %
Al ₂ O ₃	15,0 – 20,0 %	K ₂ O	0,5 – 1,0 %
Fe ₂ O ₃	5,0 – 6,0 %	TiO ₂	0,6 – 0,9 %
Na ₂ O	2,5 – 3,5 %	S	0,2 – 0,4 %
CaO	3,0 – 4,5 %		

Particle Size (Air Jet Sieving)

Sieve [µm]	Retention [%]
355	98 - 100
71	75 - 85
32	45 - 60

Physical Properties

Moisture	9 – 13 %
Swelling	12,0 – 17,0 ml/g
Colour	Yellowish grey

Mineralogy

Bentonite is a Si-Al-Si-structure, consisting mainly of the mineral montmorillonite.

Packing

The material is delivered in bulk.

Warning!

Bentonite contains crystalline silica (quartz). Crystalline silica dust finer than 5 µm is classified as a potential health hazard. Precaution measures in order to prevent inhalation of fine dust are always needed, when dealing with silica based materials. Wear suitable personal respiratory equipment and keep dust as low as possible.

Note

All analysis data are based on average values and should be taken as guidance only.

Fig. 22. Datablad for aktivert kalsiumbentonitt.

pulvermembran. Betegnelsen henspiller på at produktet både fungerer som et tetningsmedium og som en reaktiv barriere. Et tverrsnitt av membranen som er brukt på Storranden er vist i fig. 23. Som figuren viser består løsningen av 3 lag: Et lag med Blueguard 63, et lag med aktivert kalsiumbentonitt og et topplag med stedege masser. Blueguardlaget har som tidligere nevnt en permeabilitetskoeffisient på ca 5,51 m/år, hvilket tilsier at svært lite vann vil trenge gjennom ved vanlig nedbør og snøsmelting. Det vannet som måtte trenge gjennom har høy pH og inneholder reaktive svevepartikler som effektivt binder opp eventuelt utløste tungmetaller.

Bentonittlaget er impermeabelt så lenge laget ikke utsettes for lang tids tørke. Først når porevannet fordampes fra de minste hulrommene mister bentonitten sine spesielle tetningsegenskaper. Porevannet er imidlertid meget sterkt bundet og vil ikke fordampe selv ved langvarig tørke sommerstid.

På grunn av lagets seige konsistens kan det strekkes svært mye før det revner. Den selvlegende egenskapen

vil uansett begrense lekkasjen til et minimum. Om skader som medfører lekkasje likevel skulle oppstå, vil underliggende Blueguardlag fange opp lekkasjen og hindre utlekking av tungmetaller.

Topplaget av stedege masser har en dobbeltfunksjon. Laget skal beskytte bentonitten mot mekanisk skade fra aktivitet på deponioverflaten og fungere som en "motvekt" slik at svellingen gir et tett og robust tetningssjikt som kan motstå harde, mekaniske påkjenninger.

Til capping av forurensede sedimenter i vann og vassdrag har Sibelco i samarbeid med Forsvarsbygg utviklet et granulert produkt bestående av Blueguard 63, aktivert kalsiumbentonitt og et kromfritt bindemiddel. Granulatet blir testet i forbindelse med gruveprosjekter Forsvarsbygg Utvikling er engasjert i ved Løkken og Tverrfjellet gruver. En prøve av produktet er lagt ut i Hjerkinndammen hvor forurensede bunnsedimenter lekker ut i vannfasen.

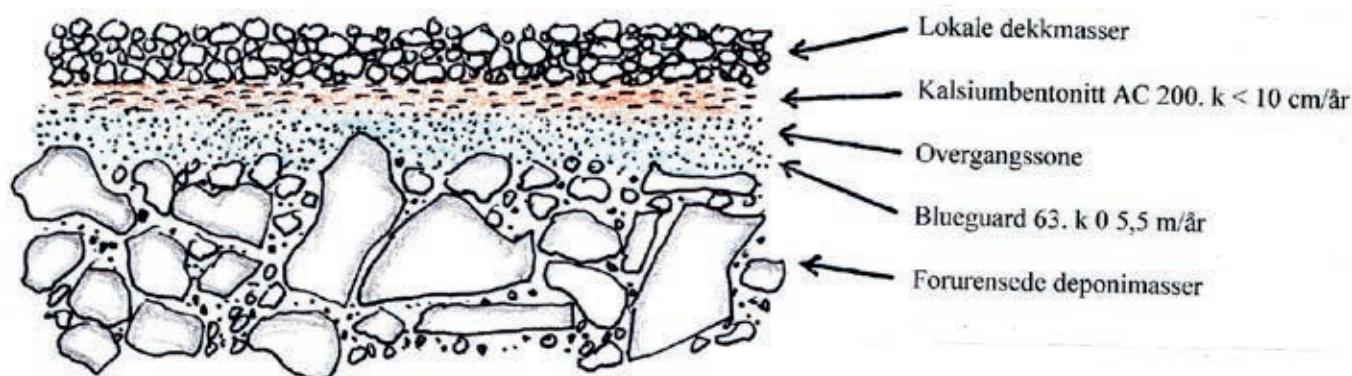


Fig. 23. Snitt gjennom den reaktive pulvermembranen som er lagt ut på tungmetalldeponiet på Storranden. De lokale dekkmassene hindrer fri ekspansjon av bentonitten hvilket gir maksimal tetthet. . Dekkmassene hindrer dessuten uttørring av bentonitten. I overgangssonen er bentonitt og olivin blandet sammen. Blandingen gir en svært tett og stabil overgang til olivinen under.

PRAKTISKE LØSNINGER PÅ AVRENNINGSPROBLEMER I REGIONFELT ØSTLANDET OG HJERKINN SKYTEFELT

Selv om testing og valg av rensemedier og andre tiltaksmidler har vært viktig i arbeidet med å løse avrenningsproblemene i RØ og Hjerkinnskytefelt, har de praktiske renseløsningene likevel gitt de største utfordringene. Mange alternativer, både eksisterende og nyutviklede, har blitt vurdert. De fleste er blitt forkastet, men noen er funnet levedyktig og resultert i fullskalaanlegg både i RØ og på Hjerkinnskytefelt. Utfordringen har hele

tiden vært på kort varsel å finne effektive og robuste løsninger med den best tilgjengelige kunnskapen og teknologien. Løsningene som er beskrevet i dette kapitlet gjør ikke krav på å være de beste under alle forhold. Noen løsninger er eksempler på at utradisjonell tenking kan gi overraskende resultater som kan komme til nytte også i andre prosjekter.

RENSELØSNINGER BRUKT PÅ HJERKINN

Hjerkinn har vært Forsvarsbygg utviklings viktigste arena for utprøving av nye renseløsninger. Årsaken er at ett av Europas største naturrestaureringsprosjekt, tilbakeføringen av Hjerkinn skytefelt til sivile formål, ligger på Hjerkinn. I tillegg er Forsvarsbygg Utvikling engasjert i oppryddingen av det tungmetallholdige avløpet fra Tverrfjellet gruver som også ligger på Hjerkinn. I begge prosjektene er det åpnet for nytenking og valg av utradisjonelle løsninger på et vidt spekter av problemstillinger. For å øke bredden i utprøvingsarbeidet er det i tillegg gjennomført eksterne prosjekter hvor tungmetallholdig industrivann har vært tema. Prosjektene, som er gjennomført ved Oppland Metall og Raufoss metall, har åpnet for sivil bruk av en del av de løsningene som er beskrevet i de påfølgende avsnittene.

FILTERLØSNINGER VED TVERRFJELLET GRUVE OG RAUFOSS METALL

Tverrfjellet gruve er nærmeste nabo til Hjerkinn skytefelt. Gruva, som først og fremst produserte kobber og svovel, ble nedlagt i 1993 etter 25 års drift. Etter nedleggelsen ble gruverommene langsomt fylt med vann. I 2008 ble det første overløpet med sterkt forurenset gruvevann registrert fra Jernbanestollen i gruva. Reaksjonene på overløpet kom raskt med krav om rens tiltak etter som den fiskerike Hjerkinndammen og elva Folla er resipient for overløpet. Kontakt ble etablert mellom Bergvesenet (nå Direktoratet for mineralforvaltning) og Forsvarsbygg utvikling for å klarlegge om kompetansen som var utviklet gjennom tiltaksarbeidet i Hjerkinn skytefelt og RØ også kunne utnyttes for rens tiltak i Tverrfjellet gruve. Vinteren 2009 ble det inngått



Fig. 24. Kart over Hjerkinnområdet. Administrasjonssenteret for Hjerkinn PRO er markert med blå pil. Forsøksanleggene ved Jernbanestollen er vist med rødt felt.

avtale mellom Forsvarsbygg utvikling og Bergvesenet om utprøving av olivinggranulatet Blueguard som filtermedium for det tungmetallholdige gruvevannet. Kontrakten innebar en langt grundigere testing av granulatet enn hva som var mulig å få til i skytefeltet. For å få ytterligere erfaring med granulatet ble det også inngått avtale om forsøk ved Raufoss Metall som har et komplisert prosessvann med høyt innhold av tungmetaller. Samarbeidet gjorde det mulig å teste fire forskjellige renseløsninger hvorav tre med Blueguard som filtermedium. Forsøkene fikk avgjørende betydning for den endelige løsningen av avrenningsproblemene i skytefeltet, og er derfor behandlet først i presentasjonen av renseløsninger.

PERKOLASJONSFILTERET VED JERNBANESTOLLEN

For å teste olivinggranulatets rensesegenskaper ble det bygget et perkolasjonsbasseng ved Jernbanestollen med muligheter for å belaste filteret både motstrøms og medstrøms. Det ble benyttet et prefabrikkert, korrugert stålbaseng med en tett plastmembran som innerduk (fig. 25). Bassenget, som hadde et volum på 9 m³, ble levert flatpakket og var meget enkelt å transportere og

montere. Som filtermedium ble det brukt 5 m³ Blueguard med massiv olivinkjerne. Testvannet ble hentet i utløpsbekken fra Jernbanestollen (fig. 26) og fordelt i bunnen av bassenget via et perforert rørkryss.

Forsøkene i perkolasjonsbassenget ble gjennomført med tre hovedmålsetninger:

1. Klarlegge olivinggranulatets renssevne og renskapasitet.
2. Klarlegge anleggets hydrauliske funksjon driftet som motstrømsfilter og gravitasjonsfilter.
3. Klarlegge gjentettingsforløpet i filtermediet.

Vannet som ble brukt i forsøkene avviker fra avrenningen i skytefeltet både på konsentrasjoner og parametre. Som tabell 3 viser er innholdet av kobber, sink og ssvovel høyt og langt høyere enn det en finner i skytefeltet. I motsetning til i de fleste kisgruver, som har avrenning med svært lav pH, ligger pH rundt nøytralpunktet i Tverrfjellet. Vannet er dessuten fritt for organisk materiale hvilket er positivt for tilbakeholdelsen av tungmetaller i et filterbasert rensenanlegg.



Fig. 25. Perkolasjonsbassenget ved utløpet av Jernbanestollen. Bassenget kan driftes både motstrøms og medstrøms.



Fig. 26. Utløpsbekken fra Jernbanestollen i Tverrfjellet gruve hvor vannet til forsøkene ble hentet. Vannkvaliteten er vist i tabell 3 på neste side. Det gule slamm i bekken består av gips og jernhydroksid.

Anlegget ble driftet kontinuerlig som motstrømsfilter i 4 måneder fra begynnelsen av juni til slutten av september 2009. Innløpsventilen ble stilt inn på 0,25 l belastning pr m² filterflate og minutt. På grunn av problemer med gipsutfelling i ventiler og vannmålere ble belastningen i praksis noe mindre og ble i gjennomsnitt beregnet til 0,15 l/m²/min. Dette tilsvarer en gjennomsnittlig oppholdstid på ca 5 timer forutsatt at hele filtervolumet er aktivt.

Tabell 3. Vannkvaliteten i utløpsbekken fra jernbanestollen (Etter NIVA³⁸).

Stasjon: Utløp rør fra jernbanestollen										x) Overløp terskel inne i jernbanestollen							
Dato	pH	Kond	SO ₄ ²⁻	Ca	Mg	Al	Fe	Cu	Zn	Cd	Pb	Ni	Co	Mn	Si	Vannf.	
		mS/m	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	l/s	
x) 05.11.2008	6,02	118,2	657	209	34,2	<0,02	0,0066	6,34	25,4	0,103	<0,005	0,036	0,078	2,50	4,43	10,0	
05.11.2008	6,96	92,2	468	205	33,0	<0,02	<0,002	1,77	18,5	0,073	<0,005	0,025	0,051	1,95	5,40		
18.12.2008	7,02	97,0	530	150	25,1	0,250	3,48	4,15	14,9	0,051	0,02	0,028	0,041	1,67	4,51	18,3	
15.01.2009	7,05	98,4	536	153	25,2	0,060	1,63	2,40	13,6	0,045	0,01	0,025	0,037	1,60	4,28	15,1	
16.02.2009	7,17	100,0	521	163	27,1	0,076	1,68	1,83	13,2	0,041	<0,01	0,023	0,036	1,63	4,19	12,3	
24.03.2009	7,11	105,9	557	177	29,5	0,047	1,39	0,94	12,4	0,035	0,01	0,022	0,034	1,66	4,18	11,0	
22.04.2009	7,06	83,6	398	131	21,6	0,024	0,86	0,36	7,30	0,019	<0,01	0,014	0,020	1,05	3,92	11,1	
18.05.2009	7,09	94,9	485	155	23,4	0,079	1,57	1,84	12,6	0,040	<0,01	0,023	0,039	1,46	4,34	20,7	
12.06.2009	6,48	116,2	817	172	25,6	0,076	2,05	3,93	14,9	0,051	<0,01	0,030	0,043	1,79	4,71	16,9	
14.07.2009	6,75	127,4	641	185	28,4	0,221	3,66	5,24	17,1	0,060	0,01	0,033	0,050	1,98	4,84	9,29	
19.08.2009	6,85	108,0	599	178	27,3	0,130	3,66	4,29	18,4	0,067	0,01	0,030	0,046	1,88	4,76		

³⁸ E.R. Iversen 2009: Kontroll av avrenningen fra Tverrfjellet gruve. Konsulentrapport. NIVA.

Registreringer som ble gjort mot slutten av forsøksperioden avdekket at ikke hele filtervolumet var aktivt i renseprosessen. Deler av filtervolumet var inaktivt på grunn av uheldig utforming av fordelingsystemet. Dette medførte ujevn belastning med en reell oppholdstid som var vesentlig kortere enn 5 timer. Ved senere forsøk gjort ved Oppland Metall og Raufoss Metall ble det tatt lærdom av dette og rørkrysset i bunnen av filteret ble erstattet med et høypermeabelt fordelingslag av dekk-klipp.

Resultatene av forsøkene med motstrømsfilteret var imponerende. Som tabell 4 viser var renseeffekten gjennom hele forsøksperioden høy og svært stabil. Med unntak av krom og nikkel lå renseeffekten gjennom hele perioden over 95 %

Av tabell 4 kan en lese følgende:

1. I starten av forsøksperioden var pH i utvannet meget høy (> 11). Dette skyldes overskuddssement som etter hvert ble vasket ut av granulatet. Det nye granulatet som produseres av Sibelco (Blueguard G 1-3) har mindre overskuddssement og pH stabiliseres raskere enn med det opprinnelige granulatet.
2. Kromverdiene var gjennom hele forsøksperioden høy i forhold til innverdien. Også dette har sammenheng med sementen som ble brukt som bindemiddel i granulatet. Portlandsement inneholder krom (ikke Cr⁶) som løses i vannet. I Blueguard G 1-3 er Portlandsementen erstattet av et kromfritt bindemiddel slik at kromlekkasje ikke lenger er et tema.
3. Prøveserien tatt 14.09.09 har høyere verdier enn

Tabell 4. Analyseresultater fra prøver tatt fra motstrømsfilteret gjennom en driftsperiode på 4 mnd. Alle verdiene er i µg/l.

Parameter	Innløp*	15.07.09	14.08.09	14.09.09	28.09.09	Renseeffekt Pr 28.09.09
pH	6,8	> 11	-	7,7	-	
Arsen	1,0	<0,2	< 0,2	0,057	< 0,2	> 90 %
Kadmium	70	<0,01	<0,01	<0,01	2,6	96,3 %
Krom	1	29	36,9	2,1	24	-
Kobber	4 000	4,0	14,1	230	47	98,8 %
Nikkel	26	<0,5	<3	18	4,1	84,2 %
Bly	7	0,25	<1	<0,01	0,24	96,6 %
Sink	25 000	13	16,3	5 500	490	98,0 %
Gjennomstrømningsvolum i m ³		Ca 2 000 m ³	Ca 4 500 m ³	Ca 8 000 m ³	Ca 10 000 m ³	

* Innløpsverdien er et gjennomsnitt av 4 målinger i perioden. Det kan ikke utelukkes at verdien i perioder med sterk nedbør har vært lavere.

gjennomsnittsverdien for de fleste parametre. Dette skyldes en teknisk svikt som medførte at belastningen på filteret på prøvetakingstidspunktet var ca. 3 ganger høyere enn normalbelastningen. Dette medførte kanaldannelser slik at store deler av filtervolumet var inaktivt.

- Ser en bort fra prøveserien 14.09.09 er renseeffekten forbausende stabil gjennom forsøksperioden. Det er spesielt interessant at de forsvarsrelaterte tungmetallene bly, kobber og sink alle viser renseeffekter på over 95 % etter at 10 000 m³ forurenset vann har passert filteret. Dette er et bedre resultat enn i de fleste andre forsøk og må tilskrives gruvevannets spesielle sammensetning med høy andel frie ioner og liten eller ingen andel partikkelbundne tungmetaller. Etter som organisk materiale heller ikke finnes er vannet i tillegg fritt for kompleksbindinger som kan forstyrre renseprosessen.

Så lenge anlegget ble driftet som motstrømsfilter hadde en ingen tegn til gjentettingsproblemer til tross for at overtrykket var < 0,1 bar. En fikk derimot et tynt dekke av fint slam på toppen av filteret. Slamdannelsen skyldtes felling av jernhydroksid og gips som følge av at kalium, svovel og små mengder toverdig jern passerte gjennom filteret.

Etter dårlig erfaring med gjentetting i gravitasjonsfiltere med fri tilgang til luftens oksygen i infiltrasjonssjiktet,

ønsket en også å teste denne problemstillingen i anlegget ved Jernbanestollen. Vannstrømmen ble derfor snudd med perkolasjon ovenfra og ned. Resultatet ble en øyeblikkelig dannelsen av en film med gips og jernhydroksidslam på infiltrasjonsflaten. Etter en uke var infiltrasjonsflaten fullstendig dekket av slam og permeabiliteten sank til praktisk talt 0. En kjemisk analyse av slammet viste svært lave konsentrasjoner av tungmetaller. Kobberkonsentrasjonen var f.eks. bare 1,5 % av konsentrasjonen i innvannet. Tilsvarende verdi for sink var 0,8 %. For de øvrige metallene ble det ikke registrert tilbakeholdelse i det hele tatt. *Det kan derfor konkluderes med at gjentettingslaget ikke deltar aktivt i tilbakeholdelsen av tungmetaller og heller ikke har egenskaper som vurderes som*

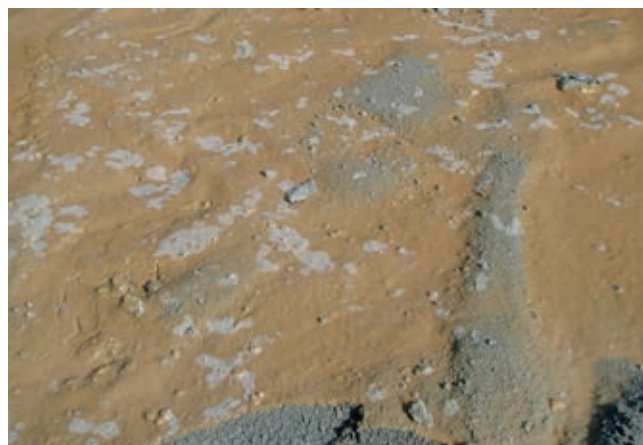


Fig. 27. Utfelt slam av gips og jernhydroksid på overflaten av gravitasjonsfilteret. Slamlaget var praktisk talt impermeabelt slik at filteret sluttet å fungere etter få dager.

positive i renseprosessen. For rensing av gruvevannet er med andre ord gravitasjonsfiltre ikke egnet.

En problemstilling som er viet liten oppmerksomhet er kanaldannelser med tilhørende kortslutningsstrømmer i oppstrømsfiltre. Ved kanaldannelser reduseres renseeffekten fordi deler av vannstrømmen går gjennom åpne kanaler. Kanaldannelsen er en funksjon av flere faktorer som kornstørrelse, partiklenes egenvekt, filtertykkelse og vannets trykk og strømningshastighet. Strømningshastigheten betyr mest etter som vannets evne til å fortrenge partikler øker med kvadratet av strømningshastigheten.³⁹ Også vanntrykket betyr mye. Selv ved lave strømningshastigheter oppstår det trange kanaler hvis trykket er tilstrekkelig høyt. Fig. 28 viser et utsnitt av overflaten på motstrømsfilteret ved Jernbanestollen mot slutten av driftsperioden. De små kraterne som er spredt ut over filterflaten er utløpet av kanaler som er dannet i filtermediet. Kraterne er blitt synlig på grunn av det tynne slamlaget som ble dannet på toppen av filteret.

Som en ser er kraterne ujevnt fordelt over filterflaten. Også diameteren på kanalene varierer. Dette medfører at belastningen på filteret blir ujevn. Enkelte partier har høy belastning, mens andre partier er praktisk talt inaktive i renseprosessen. Ved å øke strømningshastigheten ut over en kritisk grense oppstår massive kanaler med tilhørende sterk reduksjon av renseeffekten.

For å klarlegge om de positive erfaringene med motstrømsfilteret ved Jernbanestollen kan overføres til andre vannotyper, ble det igangsatt forsøk med kjølevann fra messingproduksjonen ved Raufoss Metall. Kjølevannet avviker sterkt fra gruvevannet både når det gjelder vannets tungmetallkonsentrasjon, temperatur og viskositet. Gruvevannet har en temperatur på ca 4°, mens temperaturen på kjølevannet ligger mellom 30 og 40° ved utløpet av kjølebassenget. Den høye temperaturen gir et vann med lav viskositet og bedre penetrasjonmulighet internt i granulene i rensemediet.⁴⁰

I figuren 29 er forsøksoppsettet for Raufossprosjektet

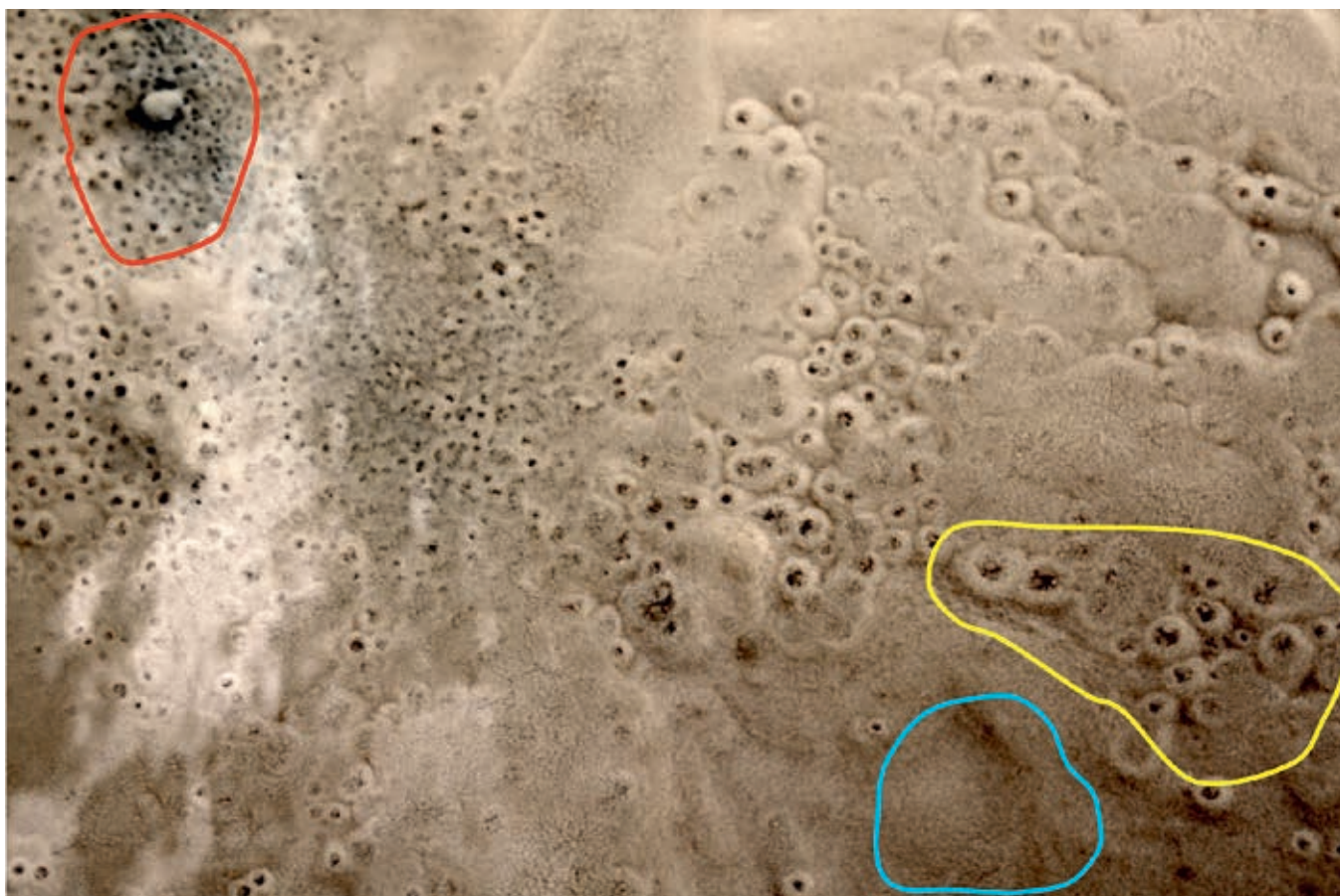


Fig. 28. Kanaldannelser i motstrømsfilteret ved Jernbanestollen. Selv med en strømningshastighet på 4 - 8 mlt får en dannet kanaler med opp til 2 mm diameter. Kanalene er ujevnt fordelt over filterflaten. Området merket med rødt har stort antall kanaler, mens det blå området ikke har kanaler i det hele tatt. I det gule området har en kanaler som har så stor diameter at de kan påvirke renseeffekten i filteret.

³⁹ E. Reinius 1964: Vattenbyggnadsteknik. Svenska bokförlaget.

⁴⁰ Målt i mPa-s har vann som holder 1°C mer enn dobbelt så høy viskositet som vann med en temperatur på 30°

vist. For å ha full kontroll med prosessen er filteret bygget inn i en plasttank hvor granulatet ligger på et fordelingslag av dekk-klipp. Dekk-klippet har et porevolum på over 50 % og fordeler vannet meget godt i infiltrasjonssonen. Driften styres av en matepumpe påmontert vannmåler og strupeventil. Vanntilførselen og oppholdstiden styres med strupeventilen. Forsøkene ble gjennomført med motstrøms belastning av filteret. Forsøksvannet, som ble pumpet fra kjølevannsbassenget mens støpingen pågikk, hadde følgende gjennomsnittsverdier for hhv. bly, kobber og sink: 503 µg/l, 573 µg/l og 5 433 µg/l.

Forsøkene pågikk over en periode på 30 dager med start 11.01.2010 og prøvetaking hver uke. Følgende renseeffekter ble oppnådd ved forsøkets avslutning:

Bly:	97 % med 14 µg/l som restverdi i vannet.
Kobber:	90 % med 55 µg/l som restverdi i vannet
Sink:	95 % med 251 µg/l som restverdi i vannet.

I tillegg oppnådde en å fjerne 100 % av alt nikkel og 82 % av alt kadmium fra vannet.

En viktig del av undersøkelsene var å klarlegge hvor lang oppholdstid som var nødvendig for å gi full renseeffekt i filteret. Oppholdstiden ble justert med strupeventilen. Lengste oppholdstid som ble brukt var 30 minutter, mens korteste ble satt til 8 minutter. Ved kortere oppholdstid enn 8 minutter fikk en så kraftig kanaldannelse at strømningsbildet i filteret ble forstyrret.

Det ble ikke påvist signifikant forskjell i renseeffekten innenfor det valgte tidsintervallet for oppholdstid. Det er med andre ord ingen effekt i å øke oppholdstiden ut over 8 minutter. For å være sikker på at kanaldannelser med kortslutningsstrømmer ikke oppstår ble det likevel anbefalt å bruke en oppholdstid på 15 minutter i et eventuelt fullskalaanlegg. Lengre oppholdstid kan være nødvendig når det forurensede vannet har svært lav temperatur og viskositeten er tilsvarende høy.

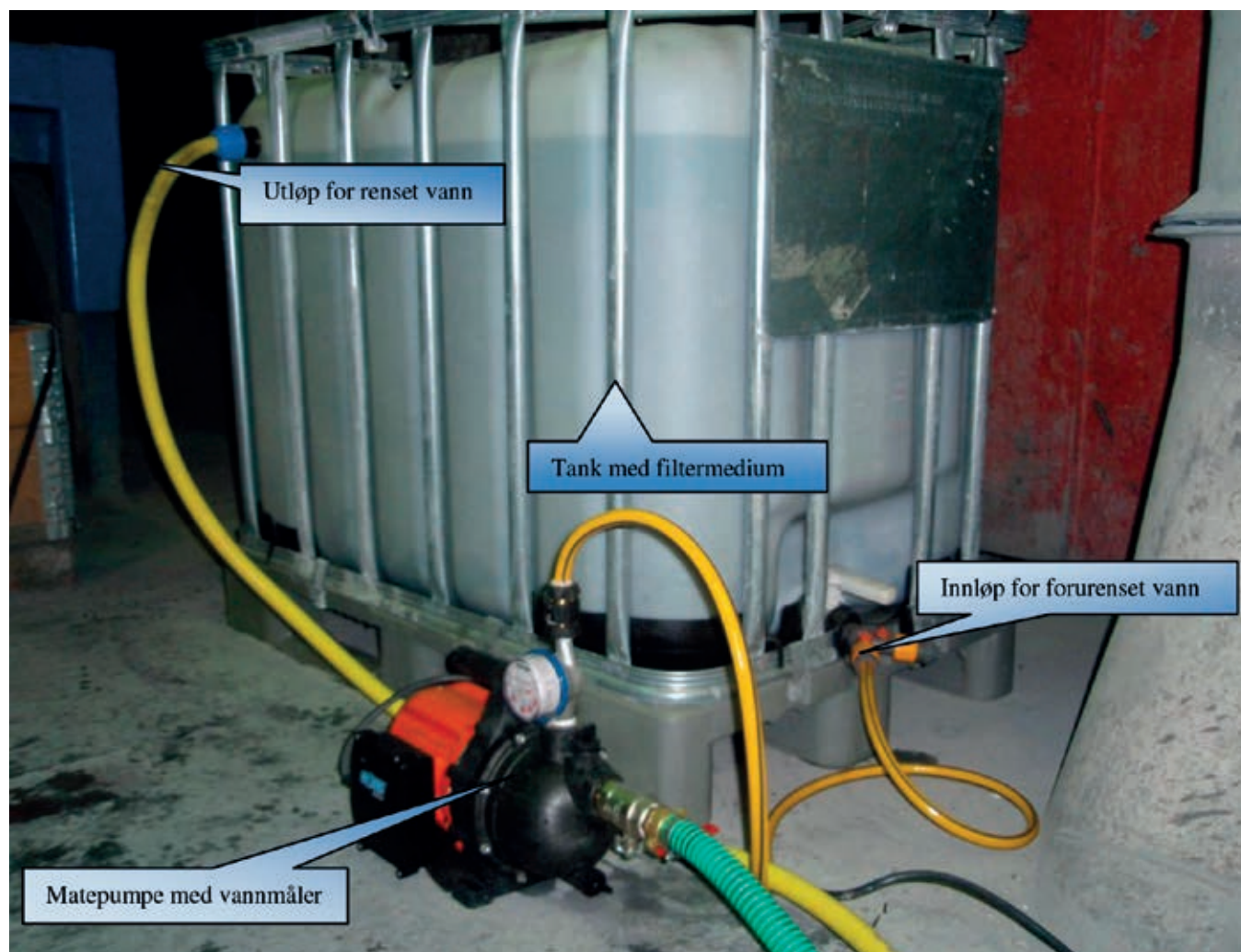


Fig. 29. Forsøksanlegget for rensing av kjølevann ved Raufoss Metall.

Parallelt med forsøkene ved Raufoss Metall ble det også gjort registreringer ved et fullskala motstrømsanlegg for prosessvann med Blueguardgranulat som filtermedium ved Oppland Metall i Hunndalen ved Gjøvik. Anlegget ble bygget for å redusere utslippet av tungmetaller til Hunselva. På grunn av høyt innhold av oljeprodukter i vannet var renseresultatet varierende. I perioder med lavt oljeinnhold oppnådde en tilsvarende renseseffekt på tungmetaller som på Hjerkin og ved Raufoss Metall. Ved høyt oljeinnhold var renseseffekten dårlig.

Resultatene fra forsøkene med perkolasjonsfiltere for avløpsvann fra Tverrfjellet gruve og prosessvann fra Raufoss Metall viser at filtertypen er en lettdrevet og robust løsning med gode renseresultater. Anleggstypen anbefales for tilsvarende vanntyper. En kan imidlertid neppe forvente like gode resultater for vann med høyt innhold av organiske syrer, kompleksbindinger og partikkelbundne tungmetaller. Tester må derfor gjennomføres med den aktuelle vanntypen før perkolasjonsfiltere velges som fullskala løsning.

KONTAKTFILTERET VED JERNBANESTOLLEN

Et kontaktfilter er en svært enkel renseløsning der en har tilgang på egnede arealer. Prinsippet for anleggstypen er at det forurensede vannet risler over en filterflate hvor tungmetallene fanges opp og adsorberes til ledige bindingsplasser i filtermediet. Filtertypen ble først brukt ved blyforurensningen i Deifjellet i RØ. Dette var imidlertid et feltanlegg hvor det var vanskelig å få eksakte målinger på filterets renseseffekt. For å bøte på

dette ble det bygget et forsøksfilter ved Jernbanestollen hvor en hadde full kontroll med alle viktige parametre. Et tverrsnitt av forsøksfilteret er vist i figur 30.

Kontaktfilteret ble drevet parallelt med perkolasjonsfilteret med en startbelastning på ca. 40 m³ pr. døgn. På grunn av gjentetting i rør og ventiler var belastningen vesentlig lavere i enkelte perioder. Også vannmålerne fungerte dårlig på grunn av utfelling av gips og jernslam. Da anlegget ble stoppet i oktober 2009 var den beregnede vannmengden som var gått over filterflaten ca 4 000 m³. Det understrekes at dette er en beregnet, ikke målt vannmengde. Etterkontroll av innløpssystemet sommeren 2012 viste at luftlommer kan ha blokkert innløpet periodevis og at den totale vannmengden som er behandlet på filteret er mindre enn 4000 m³.

Tabell 5 viser hvilke renseresultater som ble oppnådd gjennom driftsperioden på 4 måneder.

Som det fremgår av tabellen er renseseffekten god, men noe varierende gjennom hele driftsperioden. Variasjoner kan skyldes at belastningen var ujevn på grunn av luftlommer og utfelling i innløpssystemet.

De beste resultatene ble oppnådd ved siste prøvetaking i månedsskiftet september/oktober. Med unntak av bly og krom var renseseffekten > 95 % som vurderes som meget tilfredsstillende for en så enkel og robust renseløsning som et kontaktfilter er. I likhet med i perkolasjonsfilteret skyldes den høye kromverdien overskuddssegment fra granulatet.

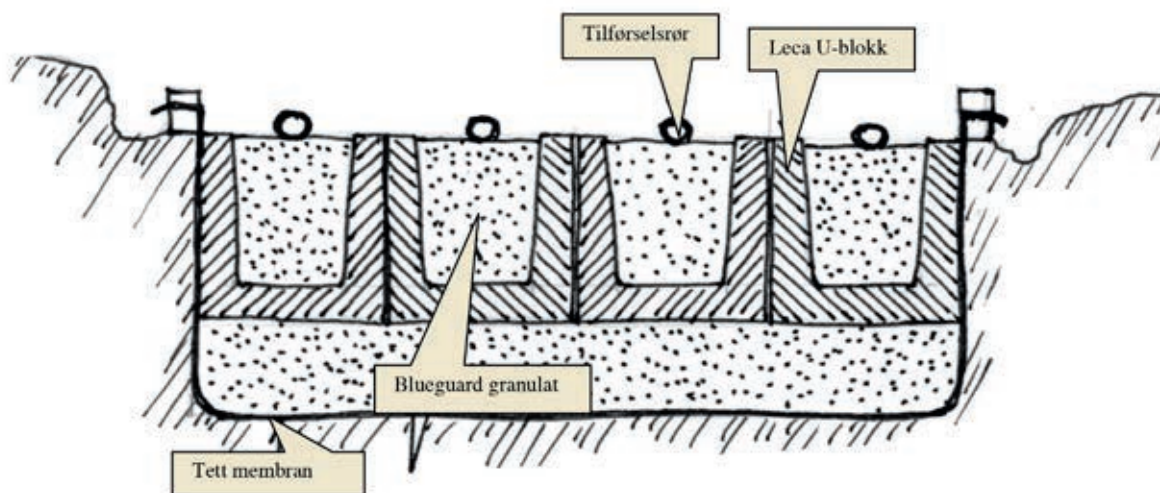


Fig. 30. Kontaktfilteret ved Jernbanestollen. For å gi en jevn fordeling av vannet over filterflaten er det brukt strenger med Leca U-blokker lagt i Blueguardseng. Filteret er 1,2 m bredt, 0,35 m dypt og 30 m langt.

Tabell 5. Analyseresultater fra prøver tatt ved utløpet av kontaktfilteret gjennom driftsperioden. Alle verdier er i µg/l.

Parameter	Innløp*	15.07.09	14.08.09	14.09.09	28.09.09	Renseeffekt pr 28.09.09
pH	6,8	> 11	-	> 11	-	
Arsen	1,0	0,26	< 0,2	0,082	< 0,2	> 90 %
Kadmium	70	0,83	< 1	1,0	0,17	99,8 %
Krom	1	32	31,9	21	9,5	-
Kobber	4 000	65	153	30	19	99,5 %
Nikkel	26	36	<3	0,66	1,2	95,4 %
Bly	7	1,2	<5	0,048	1,4	80,0 %
Sink	25 000	213	301	330	51	99,8 %
Gjennomstrømningsvolum i m ³		Ca 800 m ³	Ca 2 000 m ³	Ca 3 100 m ³	Ca 4 000 m ³	



Fig. 31. Kontaktfilteret etter 4 måneders drift. Den brune fargen skyldes jernutfelling.

Fig 31 viser et bilde av filteret etter 4 måneders drift. Overflaten er dekket av et utfellingslag hvor det visuelle bildet domineres av oksidert jern. Det fremgår også at vannet gradvis infiltreres i filtermediet på veien fra innløpsrørene til utløpet av filteret. Dette er en gunstig situasjon da det gir muligheter for full utnyttelse av hele filtervolumet som i dette tilfellet er ca 5 m³. Infiltrasjon og intern strømning i hele filtervolumet er sannsynligvis forklaringen på at filteret har så god effekt selv etter 4 måneders drift.

I likhet med perkolasjonsfiltere er også kontaktfiltere lettdrevne og robuste renseløsninger som anbefales brukt for tilsvarende vanntyper som det en har ved

Tverrfjellet gruver. For andre vanntyper må løsningen først testes i laboratoriet før fullskala anlegg bygges. Vær oppmerksom på at anleggstypen er svært frostsatt og må dekkles med vintermatter eller annen isolasjon vinterstid.

REAKTIV KANAL I JERNBANESTOLLEN

For pH-justering og felling av gips i gruvevann benyttes det ofte reaktive *kanaler* (Reactive channels). I praksis er dette gjerne en kanal fylt med kalkstein hvor innholdet av CaCO₃ medfører felling av svovelet som gips (CaSO₄·2H₂O) samtidig som pH heves. Sammen med gipsen felles også enkelte metaller. En reaktiv kanal



Fig.32. Utsnitt av den reaktive kanalen i Jernbanestollen i Tverrfjellet gruve. Kanalen, som var 1,2 m bred og 10 m lang, ble belastet med 3 l gruvevann pr. sekund. Fargespillet i vannet skyldes først og fremst forskjellige oksidasjonsstadier for jern og kobber.

er i realiteten et kontaktfilter hvor vannmengden som strømmer over filterflaten pr. tidsenhet er vesentlig større enn i kontaktfilteret. For å få samme effekt må kanalen derfor ha større bunnareal pr. volumenhet vann enn i et kontaktfilter.

Den enkleste formen for reaktiv kanal som kan være aktuell å bruke for tungmetallholdig avløp i Forsvaret, er å legge reaktivt materiale som bunnsediment i bekkeløp eller vannsig. Dette ble første gang prøvd ved Sentralskytebanen på Bardufoss. Her ble det benyttet permeable sekker fylt med løs Leca som reaktivt materiale. Forsøket var mislykket på grunn av flomskader og tilslamming av sekkene. Løsningen er imidlertid så interessant at det ble besluttet å bygge en forsøkskanal med Blueguard olivinggranulet som reaktivt bunnmateriale i Jernbanestollen på Hjerkin. Fig. 32 viser et utsnitt av den ferdige kanalen. Kanalen ble belastet med 3 liter gruvevann pr. sekund. Med en gjennomsnittlig vannhøyde på 25 mm tilsvarer dette en oppholdstid på ca 2 minutter. Til tross for den korte oppholdstiden fikk en overraskende godt renseresultat for enkelte tungmetaller, mens resultatet var heller dårlig for andre metaller. Spesielt interessant er det at renseeffekten på kobber var hele 99 % etter at 6000 m³ vann hadde passert filteret. Også renseeffekten på kadmium og jern var god den korte oppholdstiden tatt i betraktning. Renseeffekten for jern skyldtes hovedsakelig at jern ble oksidert og felt på filteroverflaten ved fri tilgang på oksygen i kanalen.

Resultatene fra forsøkene er sammenstilt i tabell 6.

Forsøkene bekrefter at reaktive kanaler kan være aktuelle løsninger for rensing av tungmetallholdig avrenning hvor større vannmengder må behandles. Løsningen forutsetter imidlertid at det reaktive materialet beskyttes mot erosjon, og at det også benyttes en eller annen form for frostbeskyttelse for å unngå kjøving om vinteren. I avsnittet “Renseanlegget for Tverrfjellet gruver” er det beskrevet en kanal som både er sikret mot erosjon og frost.

Tabell 6. Resultatene av tungmetallforsøkene i den reaktive kanalen i Jernbanestollen i Tverrfjellet gruver.

Parameter	Innvann	Utløpsvann	Rense effekt i %
Arsen	0,056	0,056	-
Bly	<0,01	<0,01	-
Kadmium	45	20	55
Kobber	390	0,68	99
Krom	<0,05	<0,05	-
Nikkel	34	26	24
Sink	22000	17 000	23
Sulfat	1040	814	22
Jern	7,0	2,7	61
Kalsium	320	320	-

BRUK AV DEKK-KLIPP SOM RENSEMEDIUM FOR GRUVEVANN OG FORURENSET PROSESSVANN

Gjennom det såkalte *GjenVinn-prosjektet* ble det dokumentert at dekk-klipp kan ha en betydelig renseeffekt på tungmetaller.⁴¹ Ett av de forsøkene som underbygget denne konklusjonen ble gjennomført i Jernbanestollen i Tverrfjellet gruve. På oppdrag fra Bergvesenet prosjekterte, bygde og drev Forsvarsbygg utvikling et rislefilter som ble designet for å felle toverdig jern fra gruvevannet. Som rislemedium ble det benyttet dekk-klipp. Forsøkene viste at filteret i tillegg til å felle jern også bandt tungmetaller. Parallelt med forsøkene i Jernbanestollen gjennomførte Forsvarsbygg utprøving av dekk-klipp som filtermedium i et motstrøms perkolasjonsfilter ved Oppland Metall. Filteret ble konstruert for å håndtere olje- og tungmetallholdig overvann som er svært vanskelig å rense med tradisjonelle rensemetoder. Vannet hadde en sammensetning som lignet på prosessvannet fra Trandum og Rena tekniske verksteder før nye vaskemetoder ble tatt i bruk der. Filteret, som primært ble konstruert for å fjerne olje, holdt også tilbake store mengder tungmetaller.

Forsøksanleggene og resultatene fra anlegget i Jernbanestollen og ved Oppland Metall er beskrevet i de følgende avsnitt.

RISLEFILTERET I JERNBANESTOLLEN

Gruvevannet fra Tverrfjellet har høyt innhold av toverdig jern. Jernet kan skape problemer for renseprosessen i filterløsninger fordi filterpartiklene dekkes av jernslam som blokkerer bindingsplassene for andre tungmetaller. En enkel måte å fjerne jernet på er å benytte et *oksidasjonsfilter*, dvs. et filter hvor vannet risler gjennom åpne hulrom i et grovkornet filter med full tilgang til luftens oksygen. I Tverrfjellet ønsket en å prøve dekk-klipp som rislemedium fordi dekk-klipp har meget høyt porevolum og dessuten er enkelt å arbeide med. For å få størst mulig overflate i filteret ble det besluttet å bruke multiklipp, dvs. klipp med flakstørrelse 0 – 30 mm med middelflakstørrelse på ca. 20 mm.



Fig. 33. Dekk-klippet som ble benyttet i rislefilteret var multiklipp med midlere flakstørrelse på ca. 20 mm. Det ble benyttet i alt 30 tonn i filteret

Rislefilteret ble bygget opp i Jernbanestollen i en 50 m lang kanal med 1,2 m bredde og ca 0,6 m dybde. Fallet på kanalen var ca 5 ‰. For å unngå innlekking av forurenset vann fra bunn-sedimentene i stollen ble kanalen foret med en bentonittmembran før dekk-klippet ble lagt på plass. Konstruksjonen er vist på skissen i fig. 33. Tilførselen av vann til rislefilteret ble gjort gjennom et 110 mm rør fra en demning for overløpsvann i stollen. Vannmengden inn på filteret ble regulert med en strupeventil og målt med en robust vannmåler. For å få en god spredning av vannet ut over filtermediet ble tilførselsrøret avsluttet med en enkel kaskade.

Rislefilteret ble belastet med ca 3 l/s. De første ukene etter oppstart infiltrerte alt vannet i dekk-klippet rett under kaskaden og rant gjennom filteret mot utløpet uten synlig vann på overflaten. Etter hvert ble det oppstuvning av vannet i filtermediet på grunn av utfelling av jernslam som tettet porene, og større og større andel av vannet rant av på overflaten av filteret. Etter 2 måneder var hele filteret mettet og alt vannet rant av på overflaten.

⁴¹ T. Østeraas 2010: Gjenvinn prosjektet. Bruk av dekk-klipp som rensemiddel for tungmetaller. Fagrapport Forsvarsbygg utvikling

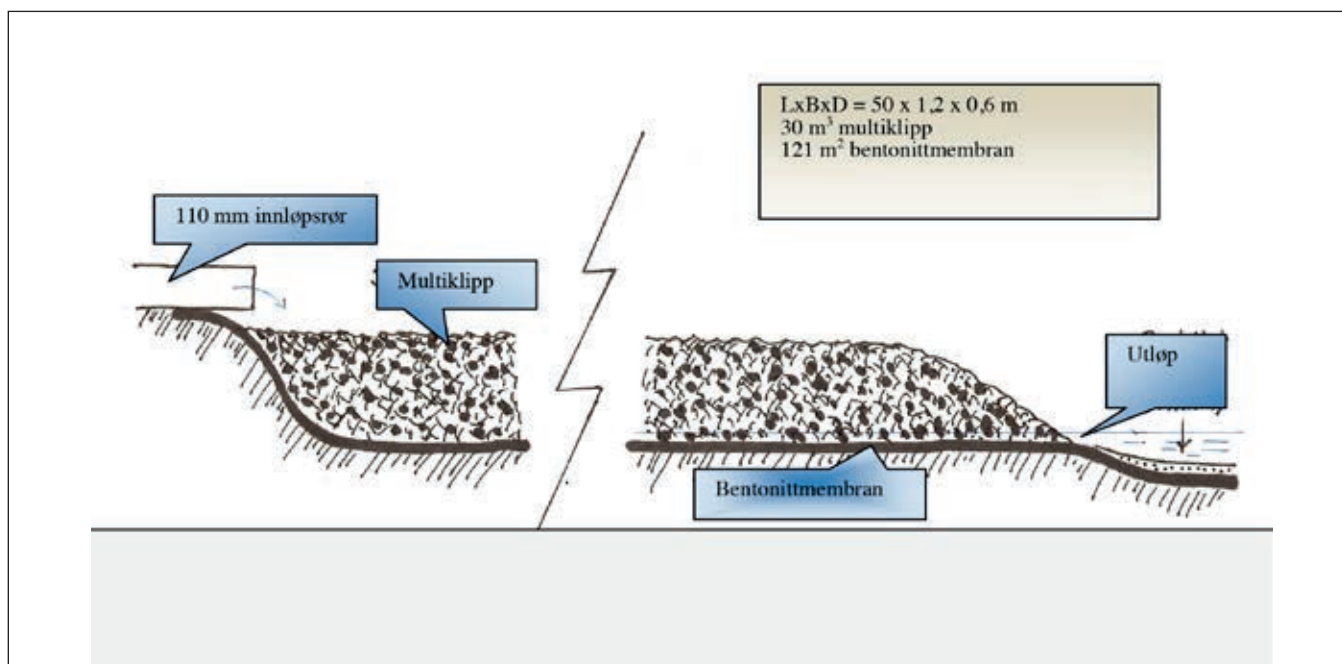


Fig.34. Lengdesnitt av rislefilteret i Jernbanestollen

Tabell 7 viser renseresultatene som ble oppnådd i perioden relatert til vannmengden som har passert gjennom filteret. Som det fremgår av tabellen har multiklippet fungert meget effektivt som rensemedium for tungmetaller. Renseeffektene for bly, kobber og jern har ligget nær 100 % gjennom hele forsøksperioden frem til filteret ble mettet. Renseeffekten på sink er lav. Dette er ikke overraskende etter som dekk-klippet inneholder forholdsvis mye lettøselig sink.

Utslipet av 4-t-oktylfenol var ca 2,5 µg/l. Dette kan synes lite, men etter som utslippskravene ligger på verdier < 0,35 µg/l er utslippet likevel betenkelig høyt.

Analysene fra 13. august viser svært lav renseeffekt for alle parametre. På dette tidspunktet var filteret tett og praktisk talt alt vannet rant av på overflaten uten å komme i kontakt med gummien.

Tabell 7. Renseeffekter i rislefilteret i Jernbanestollen. Konsentrasjonene er oppgitt i µg/l unntatt for sulfater som er oppgitt i mg/l. 30.06 var det passert **5 300 m³** vann gjennom filteret, 07.07 **10 200 m³** og 13.08 **18 850 m³**.

Dato	30.06.10			07.07.10			13.08.10		
Parameter	Inn	Ut	Rense-effekt %	Inn	Ut	Rense-effekt %	Inn	Ut	Rense-effekt %
Bly	0,34	<0,01	≈ 100	5,8	<0,01	≈ 100	8,7	10	0
Kobber	2 500	390	84	3 400	0,32	≈ 100	4 100	3000	27
Sink	26000	22000	15	25000	18000	28	35000	32000	8
Jern	160	7,0	96	5700	11	99	5700	5700	0
Sulfat	791	1040	0	1020	779	24	755	713	5
Antimon	<0,2	<0,2							
4-t-oktyl-fenol	<1,0	2300		<1,0	2500		<1,0	15	



Fig. 35. Overflaten av riskefilteret etter to måneders drift. Dekk-klippet er fullstendig dekket av et gulbrunt jernslam.

Etter at forsøkene var avsluttet ble representative dekk-klippprøver med jernbelegg tørket og kjemiske analyser ble tatt av belegget. Resultatene er vist i tabell 8. Som det fremgår av tabellen er innholdet av kobber, jern og sink svært høyt i belegget. Spesielt interessant er det at innholdet av jern er hele 11 g/kg belegg, og at det ligger over 50 kg jern i belegget på dekk-klippet. Dette viser at dekk-klipp kan brukes til å felle det toverdige jernet og derved gi vannet den kvaliteten som er nødvendig for å få den påfølgende bindingen av tungmetaller til å fungere tilfredsstillende. At belegget på dekk-klippet også inneholder hele 12 mg antimon pr kg er interessant da antimon forekommer som anion som er vanskelig å binde i minerogene filtre.

Tabell 8. Konsentrasjonen av forurensningskomponenter i belegget på dekk-klippbitene i riskefilteret.

Parameter	Konsen- trasjonen i belegget, mg/kg	Konsen- trasjonen i innløpsvan- net, mg/l	Totalt i dekk-klipp- filteret. (Estimert)
Bly	21	0,00003	0,1 kg
Kobber	840	2,5	6 kg
Sink	15000	26	13 kg
Jern	11000	0,16	55 kg
Kalsium	3900	320	3 kg
Antimon	12	<0,2	0,05 kg
Svovel	13000	790	12 kg

Forsøkene i Jernbanestollen viser at riskefilter med dekk-klipp som aktivt medium fungerer meget effektivt for oksidering og felling av toverdige jern. I tillegg har det en imponerende evne til å holde tilbake tungmetaller. Metallene bindes primært i jernslammet, men også jerncorden og tilsatsstoffene i gummien bidrar i bindingsprosessen.

DEKK-KLIPPFILTERET VED OPPLAND METALL

Avløpsvannet fra Tverrfjellet gruve er et veldefinert vann uten partikler og organiske forbindelser. Dette er atypisk for en del av forurensningene i Forsvaret, f.eks ved de tekniske verkstedene. For å få erfaring med rensing av andre og mer komplekse vann typer inngikk Forsvarsbygg Utvikling avtale med resirkuleringsbedriften Oppland Metall om forsøk med prosessvann som inneholder en rekke organiske forbindelser og syrer i tillegg til tungmetaller. Hovedproblemet med vannet er innholdet av dispergerte og frie oljeprodukter som kleber til filtermaterialet og inaktiverer bindingsplasse for tungmetaller. Da Forsvarsbygg kom inn i bildet hadde bedriften allerede et motstrøms perkolasjonsfilter med olivingranulat som filtermedium for fjerning av tungmetallene. Organisk slam og olje som passerte oljeavskillerne førte imidlertid til at olivinfilteret meget raskt ble satt ut av spill. For å løse problemet ble det foreslått å bygge et forbehandlingsanlegg med multiklipp som filtermedium. En skisse av anlegget er vist i fig. 36.

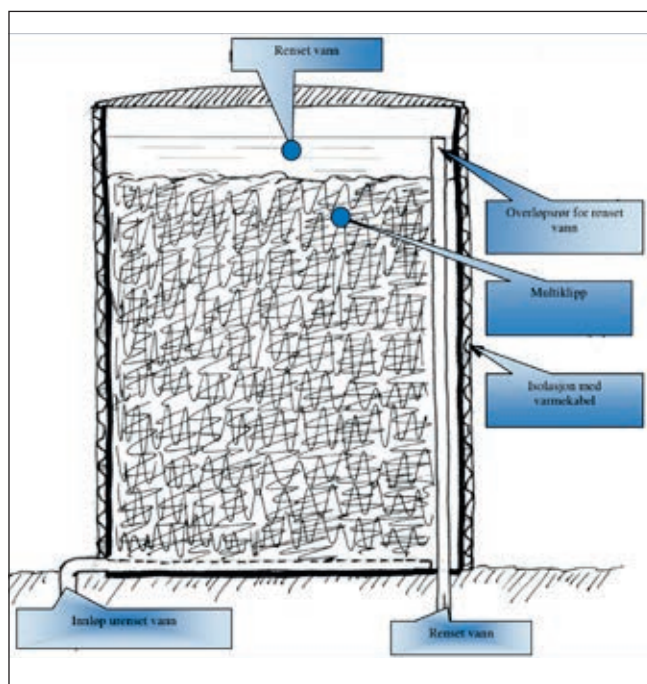


Fig. 36. Skisse av motstrømsanlegget for olje- og tungmetallholdig vann ved Oppland Metall. Multiklipp er brukt som rensemedium.

Motstrømsfilteret var kun ment å fjerne olje og organisk slam. De første analysene av utløpsvannet viste imidlertid at også tungmetaller ble holdt tilbake i tanken. Tabell 8 viser renseresultatene etter at 6 500 m³ vann hadde passert dekk-klippfilteret. Resultatene er imponerende med renseeffekter for kobber, sink og bly på godt over 90%. Innholdet av fenoler økte imidlertid noe (til ca. 3 µg/l), men den negative effekten av dette kan reduseres ved oksidasjon i fordøyningsbasseng eller i et oksidasjonskammer.

Den viktigste årsaken til at dekk-klippet holder tilbake tungmetaller antas å være at forurensningene for en stor del er partikkelbundet slik tabell 9 viser. Partiklene klebes til oljebelegget som etter hvert bygges opp på gummipartiklene. Tabellen viser at renseeffekten for løste tungmetaller er lavere enn renseeffekten for partikkelbundne forurensninger. Det finnes imidlertid unntak. For løst kobber, sink og jern er renseeffekten i % like god eller bedre enn for partikkelbundet. Mest overraskende er den gode renseeffekten på sink etter som en rekke analyser viser at dekk-klipp lekker sink.

Motstrømsfiltre med multiklipp som rensemedium fungerer meget effektivt for olje- og tungmetallholdig vann. Den viktigste prosessen er en ren mekanisk avskilling ved at oljeproduktene som inneholder par-



Fig. 37. Motstrømtanken ved Oppland Metall under bygging. For å beskytte mot frost ble det lagt en varmekabel i spiral rundt tanken før den ble dekket med vintermatter.

Tabell 8. Renseresultater for prosessvann som har passert motstrøms-tanken i fig.37. 6 500 m³ vann var blitt rensa da prøvene ble tatt. Alle verdiene er i µg/l.

	Innvann	Utløpsvann	Rense effekt i %
Arsen	1,8	0,35	80,6
Bly	870	0,01	99,9
Kadmium	2,9	0,005	99,8
Kobber	350	0,10	99,9
Krom	21	0,69	96,7
Kvikksølv	2,68	<0,002	100
Nikkel	39	4,6	88,2
Sink	4300	4,7	99,9
Antimon	4,8	0,62	87,1
Jern	18000	540	97,0
Fenolindeks	38	41	- 7,9

tikkelbundne tungmetaller klebes til gummibitene. Mettet filtermateriale må behandles som farlig avfall.

Anleggstypen er best egnet som forfilter for overvann og prosessvann som inneholder olje og organisk slam.

Tabell 9. Renseeffekter for partikkelbundne og løste tungmetaller i dekk-klippfilteret ved Oppland Metall.

Oppland Metall, gummifilter

Partikkelbundne forurensninger som bindes i filteret etter passasje av 6 500 m³ råvann.

Parameter	Partikkelbundet i innvann µg/l	Partikkelbundet i innvann i %	Partikkelbundet etter gummi-filter µg/l	Partikkelbundet fjernet i gummi-filteret i %
Arsen	0,93	49	0,16	83
Bly	374	96	108	71
Kadmium	3,86	92	1,57	59
Kobber	231	92	64,4	72
Krom	15,4	91	3,7	76
Kvikksølv	1,11	100	0,268	76
Nikkel	12	36	3,0	75
Sink	1390	77	410	71
Jern	2790	97	2560	8
Kalsium	0	0	0	0
Tinn	7,51	96	1,05	86

Oppland Metall, gummifilter

Løste forurensninger som bindes i filteret etter passasje av 6 500 m³ råvann

Parameter	Løst i innvann µg/l	Løst i innvann i %	Løst etter gummi-filter µg/l	Løst fjernet i gummi-filteret i %
Arsen	0,97	51	0,72	26
Bly	16	4	12	25
Kadmium	0,34	8	0,23	32
Kobber	19	8	9,6	50
Krom	1,6	9	1,1	31
Kvikksølv	0	0	0	-
Nikkel	21	64	14	33
Sink	410	13	110	73
Jern	210	3	440	52
Kalsium	62	100	62	-
Tinn	0,29	4	0,15	48

Gummien har minimal renseseffekt på PAH og ca 30 % renseseffekt på THC. Etter passasje av 6 500 m³ råvann lekker gummien ca 450 ng/l 4-t-oktylfenol/l

DET REAKTIVE DAMANLEGGET PÅ HFK-SLETTA

Et reaktivt damanlegg er et system av bassenger hvor partikulære forurensninger sedimenteres og kjemiske forurensninger bindes. I sin enkleste form består et reaktivt damanlegg av en separat sedimentasjonsdam og en fellingsdam med et reaktivt bunnlag. De første mer avanserte damanleggene ble konstruert under det danske *Life Treasure-prosjektet* hvor en også utnyttet plantenes evne til å binde metaller.⁴² Et eksempel på en Life Treasure-løsning er vist i fig. 38.

Forsvarsbygg Utvikling har vurdert flere varianter av reaktive dammer både i forbindelse med avrenningen fra HFK-sletta i skytefeltet på Hjerkinns og som polerings-

løsning for avrenningen fra Tverrfjellet gruver. Anlegget som ble bygget på HFK-sletta består av to sedimentasjonsbasseng koblet i serie og et poleringsbasseng med Blueguard olivingranulat som reaktivt bunnmateriale. Et oversiktsbilde er vist i fig. 39.

Anlegget på HFK-sletta ble bygget for å fange opp tungmetallholdige sedimenter etter spavendingen av toppdekket på sletta. Toppdekket består av tungmetallholdig gruvegrus. Spavending ble gjort for å bryte opp den ensformige overflaten og gi gunstigere forhold for etablering av vegetasjon. Den førte imidlertid til økt erosjon og borttransport av tungmetallholdige finpartikler.

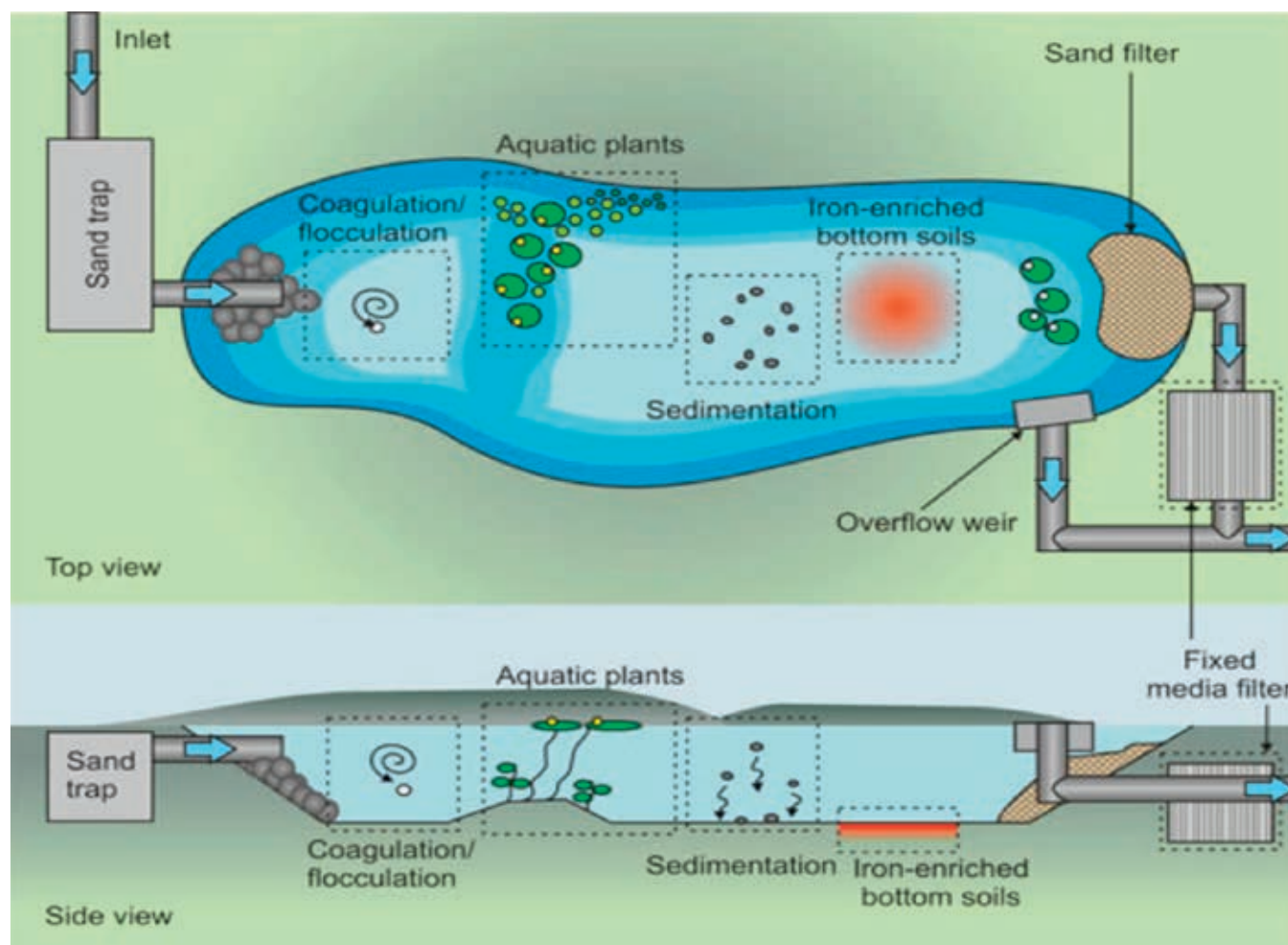


Fig. 38. Reaktivt damanlegg fra Life Treasure-prosjektet i Danmark. I dette anlegget har en kombinert flokkulering og sedimentasjon med opp-tak i vannplanter og jernanriket bunnsediment.

⁴² Samarbeidsprosjekt mellom Miljøministeriet og flere danske kommuner og universiteter i Danmark.

Målinger som ble gjort på de sedimenterte erosjonsproduktene viste at tungmetallkonsentrasjonen var vesentlig høyere enn gjennomsnittet i toppdekket (tabell 10). Det var spesielt innholdet av nikkel og antimon som var urovekkende høyt, mens innholdet av kobber var mindre i erosjonsproduktene enn i gruvegrusen. En mulig forklaring på dette kan være at kobberet går i løsning og følger vannfasen ut av feltet.

Tabell 10. Forskjell i innhold av tungmetaller (mg/kg) i erosjonsprodukter og topplaget på HFK-sletta.

Parameter	Gruvegrus	Erosjonsprodukt	Forskjell i mg/kg
Bly	Spor	Spor	0
Kadmium	10	24	14
Kobber	367	138	- 229
Krom	5	15	10
Nikkel	53	173	120
Sink	531	511	-20
Arsen	35	56	21
Antimon	12	71	59

I tillegg til avrenningen fra gruvegrusen hadde en også avrenning fra tilkjørte, tungmetallholdige masser som på grunn av høy TOC hadde en betydelig lekkasje av bly, kobber, nikkel og arsen. Også denne avrenningen ønsket en å fange opp og rense før utslipp til Grisungbekken. Det ble besluttet å samle alle avløpene fra erosjonen i ett punkt og bygge en reaktiv damløsning for å ta hånd om forurensningene.

Fig. 39 viser et oversiktsbilde over damanlegget på HFK-sletta. Erosjonsvannet renner først ut i dam 1 som er en sedimentasjonsdam for grovsedimenter. Oppholdstiden i denne dammen er kort, og den bidrar i liten grad til reduksjon i tungmetallinnholdet i vannet. Dam 2 er en større dam med lengre oppholdstid for erosjonsvannet. De bunnfelte sedimentene i denne dammen inneholder høyere konsentrasjoner av tungmetaller enn dam 1. Dam 3 er den reaktive dammen hvor de løste tungmetallene forutsettes bundet i Blueguard olivingranulat. Etter som dammene bare er i funksjon ved kraftig nedbør og snøsmelting har det vært vanskelig å få et klart bilde av hvordan funksjonen har vært. Som det fremgår av fig. 39 er det imidlertid klare indikasjoner på



Fig. 39. Det reaktive damanlegget på HFK-sletta. Dam 1 er en sedimentasjonsdam for grovkornete sedimenter, dam 2 er en tilsvarende dam for finsedimenter og dam 3 er en poleringsdam med Blueguard olivingranulat som reaktivt bunndekke. Legg merke til fargeforskjellene som avspeiler kornstørrelsen på sedimentene i dammene. Brunfargen i poleringsdammen skyldes utfelling av jern på granulatet. Sammen med jernet felles også andre tungmetaller.

at sedimentasjonsdammene har fungert etter hensikten. En enkelt prøveserie er tatt fra innløp og utløp under et kraftig regnvær med høy vannføring høsten 2012. På grunn av den korte oppholdstiden var tilbakeholdelsen av tungmetaller forholdsvis liten under denne episoden, i gjennomsnitt ca. 25 %. Tilbakeholdelsen av kobber var imidlertid ca. 40 % som anses som meget tilfredsstillende.

Reaktive dammer kan være aktuelle renseløsninger, spesielt der en har problemer med overvann, erosjon og transport av tungmetallholdige sedimenter. For at anlegget skal fungere tilfredsstillende er det viktig at oppholdstiden blir stor nok i sedimentasjonsdammene slik at mesteparten av partiklene bunnfelles. Hvis finsedimenter dras over i det reaktive bassenget kan rensemediet bli tilslammet og miste renseevnen.

RENSEANLEGGET FOR TVERRFJELLET GRUVE

Som nevnt i et tidligere avsnitt ble Forsvarsbygg Utvikling tidlig engasjert i arbeidet med å finne en robust og lettdrevet måte å rense avløpet fra Tverrfjellet gruver på. Etter en periode med utprøving ble Forsvarsbygg Utvikling sammen med Cowi AS engasjert for å prosjektere et fullskalaanlegg for gruveavløpet. Det ble tatt utgangspunkt i tre hovedmålsetninger i arbeidet:

1. Gruvas egen renskapasitet skulle utnyttes.
2. Anlegget skulle fungere uten ekstern energitilførsel.
3. Naturbaserte løsninger skulle brukes der dette var mulig.

I løsningen som ble valgt ble erfaringene fra skytefeltet brukt i stor utstrekning i de tre hovedelementene anlegget består av, nemlig gruva, det reaktive damanlegget og behandlingsanlegget for fenoler.

Gruva er et utmerket renseanlegg fordi sidebergartene i gruverommene består av basiske karbonatbergarter som nøytraliserer det sure og tungmetallholdige vannet som dannes ved oksidering av kisen. Tabell 11 viser forskjellen i tungmetallkonsentrasjonene i overflateavløpet fra gruva og i vannet som er nøytralisert etter å ha passert gruverommene.

Tabell 11. Konsentrasjonen av tungmetaller i overflateavløp og vann fra nivå 400 i gruva. Vannet fra nivå 400 er nøytralisert etter kontakt med karbonatrike sidebergarter. Alle verdiene er i µg/l.

Parameter	Overflateavløp	Nivå 400
Arsen	1,0	<0,2
Bly	7	<0,2
Kadmium	70	0,25
Kobber	4 000	5,7
Krom	1	<0,5
Nikkel	26	11
Sink	25 000	2 200

For å få tak i vannet som er nøytralisert etter kontakt med de karbonatrike sidebergartene, ble det boret en horisontalbrønn inn i en ventilasjonssjakt med innløp ca 400 m under overflatenivået. Fra horisontalbrønnen renner vannet med selvfall til det reaktive damanlegget.

Et oversiktsbilde av damanlegget er vist i fig. 40. Fig. 41 viser et tverrsnitt av oksidasjonsgrøfta som er første trinn i damanlegget.

Oksidasjonsgrøfta er første trinn i anlegget. Grøfta er ca. 50 m lang og fylt med olivinpukk og dekk-klipp. Det er benyttet både enkeltklipp og dobbeltklipp i grønfta. Enkeltklippet har som oppgave å sørge for full lufttilgang til gruvevannet slik at jernet oksideres og fnokkes. Dobbeltklippet som ligger på toppen sørger for isolasjon slik at anlegget ikke fryser på vinteren. Oksidering av jernet medfører pH-senking. Olivinpukken i bunnen av grønfta skal sørge for at pH ikke senkes under nøytralpunktet.

Neste trinn i damanlegget er sedimentasjonsbassenget hvor det oksiderte jernet felles sammen med en del av tungmetallene. Etter som jernslammet har tilnærmet samme egenvekt som vannet, kan det være vanskelig å felle, spesielt vinterstid. Det er åpnet for å tilsette polymer i vannet hvis fellingen ikke går slik som forutsatt.

Fra sedimentasjonsbassenget renner det avslammede vannet til det reaktive bassenget. Dette er bygget for å felle sink hvis nye og strengere utslippskrav blir satt på sink. Sinken vil bli felt ved dosering av Blueguard 63 direkte inn i vannstrømmen.

Etter det reaktive bassenget skal tungmetallinnholdet i vannet være under utslippsgrensen. En del partikkelbundne tungmetaller kan imidlertid følge vannstrømmen i tillegg til fenoler fra dekk-klippet. Poleringsbassenget har til oppgave å holde tilbake partiklene og oksidere fenolene.

På grunn av de strenge utslippskravene som er satt til fenoler er det bygget et eget fenolbasseng ved utløpet til Hjerkinndammen. Fenolbassenget skal fange opp og oksidere eventuelle restkonsentrasjoner av fenoler i utløpet fra poleringsbassenget. Fenolbassenget er en grunn dam i et myrområde. Torv og myrvegetasjon er bevart i bassenget, og antas å ha en positiv innvirkning på nedbrytningen av fenolene.



Fig. 40. Det reaktive damanlegget for Tverrfjellet gruve. I oksidasjonsgrøfta oksideres toverdug jern til treverdug og danner fnokker som bunnfelles i sedimentasjonsbassenget. Fra sedimentasjonsbassenget renner vannet over i det reaktive bassenget hvor felling av sink skjer. Siste trinn i tungmetallrensingen er poleringsbassenget. Fra poleringsbassenget renner vannet til et fenolbasseng ved Hjerkinndammen.

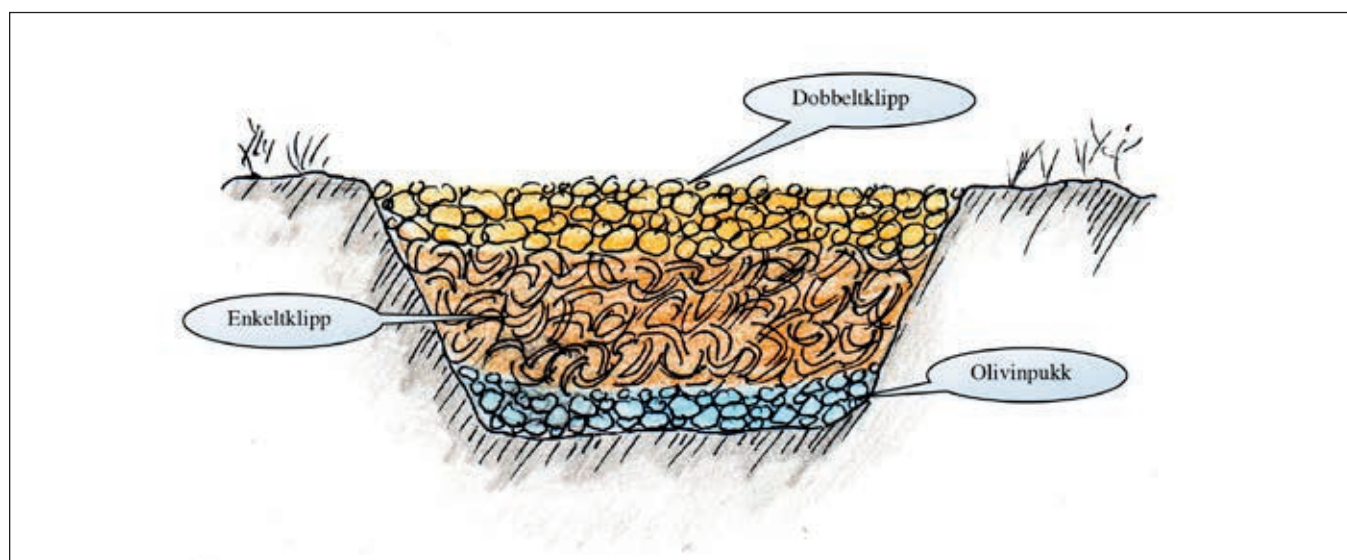


Fig. 41. Tverrsnitt av oksidasjonsgrøfta som har til oppgave å oksidere jernet og sørge for at pH ikke synker under nøytralpunktet.

CAPPING AV HFK-SLETTA I SKYTEFELTET

HFK-sletta er et stort øvingsområde som er planert og dekket med gruvegrus. Sletta inneholder store mengder tungmetaller, både fra den militære aktiviteten, fra tilkjørt gruvegrus og underliggende morene. Forurensningspotensialet er med andre ord stort. I tabell 12 er potensialet for de øverste 30 cm av sletta vist. Det understrekes at verdiene i tabellen refererer til forurensningspotensialet, ikke til den reelle avrenningsfaren.

De fleste tungmetallene er sterkt bundet både i gruvegrusen og i morenen slik at faren for lekkasje er forholdsvis beskjeden, spesielt når overflaten ikke røres. Med de inngrepene som ble iverksatt for å føre sletta tilbake til opprinnelig tilstand, ble tungmetallene i både gruvegrusen og morenen liggende åpent til for okside-

ring og avrenning. Forurensningsfaren ble derfor dramatisk forverret som følge av tiltakene. En ytterligere forverring av situasjonen oppsto da tungmetallholdige overskuddsmasser fra et kryssingsspor for jernbanen på Dovre ble lagt ut på sletta. Som nevnt under avsnittet *Det reaktive damanlegget på HFK-sletta* er lekkasjen av bly, kobber, nikkel og arsen fra overskuddsmassene betydelig, og kommer som tillegg til lekkasjene fra gruvegrusen, morenen og Forsvarets aktivitet. For å unngå at tiltakene skulle medføre en økning i avrenningen av tungmetaller til Grisungbekken ble det nødvendig å sette inn avbøtende tiltak. Etter vurdering av flere løsninger ble en stående ved *reaktiv capping* som det beste alternativet. Løsningen er beskrevet i de følgende avsnitt.



Fig. 42. HFK-sletta slik den lå før arbeidet med tilbakeføring til opprinnelig tilstand ble iverksatt. Avrenningen av tungmetaller fra sletta var på dette tidspunktet beskjeden.

Tabell 12. Innholdet av tungmetaller i gram pr m² i de øverste 30 cm av HFK-sletta. Verdiene er et kvalifisert anslag basert på XRF-målinger, kjemiske analyser og lysimetertester.

Arsen	15
Bly	8
Kadmium	6
Kobber	160
Krom	3
Nikkel	30
Sink	320
Antimon	8

Bakgrunnen for valg av capping som tiltak mot avrenningen fra HFK-sletta var delvis basert på en teoretisk vurdering, delvis på lysimetertester gjennomført ved Hjerkinns PROs laboratorium. Med unntak av de tilkjørte overskuddsmassene fra Dovre, inneholder sletta ikke masser med høy TOC. En heving av porevannets pH vil derfor medføre at bindingsplasser frigjøres i mediet og H⁺-ioner kan erstattes med tungmetaller. Bruk av et cappingmateriale som øker pH var derfor førstevalget. Både kalkprodukter og olivin var aktuelle

medier. I tillegg til å heve pH var det ønskelig at cappingmaterialet også skulle ha reaktive egenskaper, dvs. at potensialet for binding av frigitte metallioner måtte være til stede. Valget falt på Blueguard 63, både på grunn av de gode bufferegenskapene og det høye adsorpsjonspotensialet for tungmetaller som var registrert i andre prosjekter.

For å verifisere vurderingene ble det gjennomført lysimeterforsøk med gruvegrus og overskuddsmasser fra Dovre. Testene ble gjennomført både på rene masser og på masser dekket med Blueguard 63. Resultatene er vist i tabell 13.

Forsøkene viste en markert reduksjon av lekkasjen av kobber, nikkel og sink ved dekking av med Blueguard 63. For de øvrige metallene var reduksjonen ubetydelig. Dette spiller forøvrig liten rolle da konsentrasjonene uansett var svært lave for disse metallene. Kobber, nikkel og sink derimot utgjør et reelt forurensningsproblem for Grisungbekken.

Lysimeterforsøkene bekreftet at capping med Blueguard 63 reduserer faren for avrenning av tungmetaller fra den rehabiliterte HFK-sletta. Sammen med det reaktive damanlegget som fanger opp forurensningene i erosjonsproduktene gir derfor cappingen en god sikring



Fig. 43. HFK-sletta under rehabilitering. Inngrepene medførte en forverret situasjon for avrenning av tungmetaller til Grisungbekken.

Tabell 13. Resultatet av lysimeterforsøk med gruvegrus og tilkjørte overskuddsmasser fra HFK-sletta.

Parameter	Lekkasje fra ubehandlet gruvegrus	Lekkasje fra tilkjørte overskuddsmasser	Lekkasje fra tilkjørte masser dekket med 2 cm Blueguard 63	Lekkasje fra gruvegrus dekket med 2 cm Blueguard 63
Bly	0,016	6,1	2,2	0,016
Kadmium	1,2	0,16	0,084	1,2
Kobber	13	51	15	6,1
Krom	<0,05	25	3,0	0,076
Nikkel	8,8	17	17	0,10
Sink	86	35	32	7,8
Arsen	0,28	3,1	0,45	0,65
Antimon	0,12	Ikke målt	Ikke målt	0,16

mot avrenning av tungmetaller til Grisungbekken.

Utleggingen av olivinen som et jevnt dekke over hele HFK-sletta bød i utgangspunktet på visse problemer. Utlegging med kalkspredere av den typen som benyttes i jordbruket ble vurdert som den mest aktuelle, men løsningen ble forkastet av sikkerhetsmessige grunner og fordi hjulspor i den preparerte overflaten ikke var

akseptabelt. Helikopterspreading ble løsningen da både utstyret og utleggingsmetodikken var velprøvd i forbindelse med kalking av vassdrag. Utleggingen gikk meget raskt og med stor presisjon. Hele sletta på 240 daa ble dekket med et 1 cm tykt lag i løpet av 3 dager.

For å måle effekten av cappingen ble det installert 2 felt-lysimeretere på sletta. Det ene lysimeteret måler avren-



Fig. 44. Bakkestasjonen hvor fyllingen av Blueguard 63 i "bottene" som helikopteret brukte til spredning. Det tar mindre enn 1 minutt å klar-
gjøre ny bølge med ett tonn Blueguard for avhenting



Fig. 45. Utlegging av olivin på HFK-sletta skjedde med stor presisjon.



Fig. 46. Bearbeidet overflate dekket med ett lag olivin. For å få tilstrekkelig tykkelse på olivindekkeet (ca. 1 cm) måtte det legges ut 4 - 5 lag.

ningen fra løsmasser som ikke er cappet med olivin, det andre måler fra løsmasser dekket med ca 1 cm olivin. Da rapporten ble skrevet forelå det ingen analyseresultater fra lysimetrene. De vil først bli tilgjengelig sommeren 2014.

Capping av forurensede sedimenter med Blueguard 63 eller andre reaktive produkter er et godt alternativ til bortkjøring av sedimentene. Metoden er kost-

nadsmessig overlegen og gir ingen sjokkavrenning i forbindelse med gjennomføringen. Det må imidlertid understrekes at det må gjennomføres kolonneforsøk eller lysimeterforsøk som bekrefter at løsningen virker før fullskala capping iverksettes.

DEPONIENE PÅ STORRANDEN

Som et ledd i tilbakeføringen av Hjerkinns skytefelt til sivile formål var fjerning og deponering av store mengder rene og forurensede løsmasser en viktig arbeidsoppgave. Etter vurdering av flere alternativer godtok Fylkesmannen i Oppland som forurensningsmyndighet at massene kunne deponeres lokalt innenfor skytefeltets grenser.⁴³ De gamle grustakene på Storranden ble valgt som deponeringssted. I utgangspunktet ble tre forskjellige deponityper vurdert: En for rene masser, en for forurensede masser uten antimon og en for tyngre forurensninger med antimon. Av praktiske grunner ble de to siste slått sammen til én.

Deponiområdet ligger i fronten av en av de flotteste geologiske formasjonene som finnes i skytefeltet. En glasi-fluvial vifte med sand og grus dominerer landskapet og ender i en markert erosjonsterrasse som bærer navnet *Storranden*. Storranden var en viktig grusressurs for Forsvaret mens skytefeltet var i bruk, og flere grustak ble

åpnet i terrassen. Enkelte av takene ble senere benyttet som avfallsfyllinger hvor det ble deponert alt fra husholdningsavfall til store mengder metallskrot og sprengstoffrester.

Når de gamle grusuttakene ble valgt som deponiområde for ryddeprosjektet var utfordringene mange:

- Det gamle, forurensende avfallet måtte fjernes eller isoleres slik at det ikke skapte forurensningsproblemer i fremtiden.
- Den opprinnelige terrengformen måtte gjenskapes.
- De nye deponimassene måtte isoleres på en slik måte at de forble avløpsfrie i all fremtid.
- Deponiene måtte avsluttes på en slik måte at de ikke avvek visuelt fra omgivelsene.

Deponiene for rene masser ble i praksis gjenfylling av gamle grustak med tilbakeføring til en naturlig terreng-



Fig. 47. Oversiktsbilde over en av de mest markerte geologiske formasjonene i skytefeltet - den enorme, glaci-fluviale viften med rotpunkt i «R». Grustakene som ble valgt som deponiområde ligger på Storranden i fronten av viften. (Innringet med rødt).

⁴³ Fylkesmannen i Oppland 2007: Hjerkinns skytefelt - Tillatelse etter forurensningsloven for tiltak i forbindelse med tilbakeføring av skytefelt til sivile formål

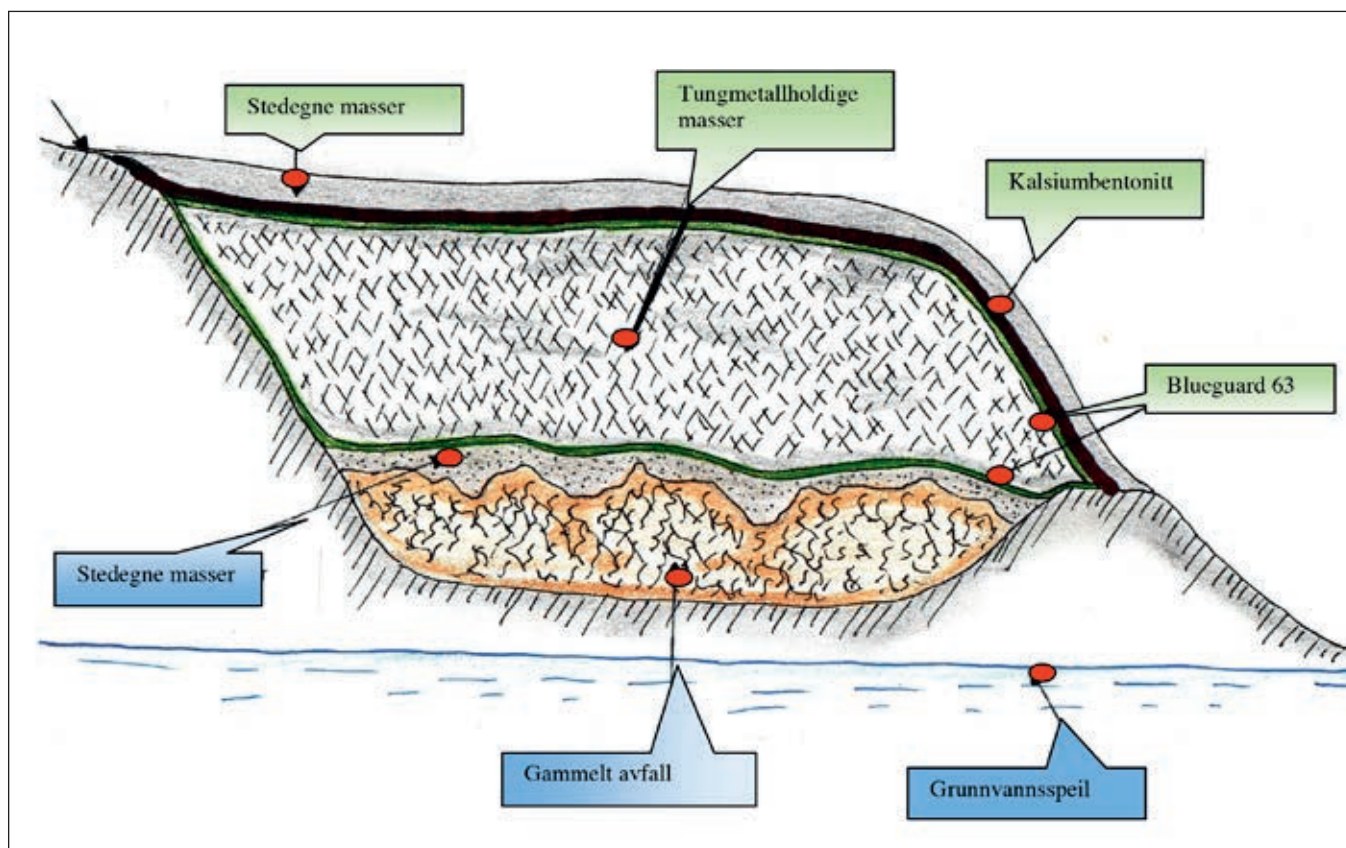


Fig. 48. Skisse av deponiet for forurensede masser på Storranden.

form. Disse deponiene er ikke omtalt nærmere i foreliggende rapporten. For de forurensede massene valgte en å konsentrere all deponering i ett område hvor det allerede lå betydelig mengder avfall fra tidligere virksomhet. Dette skapte spesielle utfordringer etter som en også måtte ta hensyn til avrenningsfaren fra det gamle avfallet. Problemet ble løst ved at det nye deponiet ble bygd over det gamle som en impermeabel skjerm. Løsningen hindrer inntrengning av vann i det gamle avfallet slik at all avrenning opphørte. En skisse av løsningen er vist i fig. 48.

Skissen viser at det under deponiet er grunnvann med et markert grunnvannsspeil. Grunnvannsspeilet, som ligger 2 - 3 m under bunnen av deponiet, fluktuerte noe gjennom året, men har aldri direkte kontakt med det gamle avfallet. Før det nye deponiet ble bygget, forurenset tungmetaller og surt sigevann grunnvannet. En prøvebrønn nedstrøms deponiet viste en pH helt ned til 4,3 og meget høye konsentrasjoner av kobber, sink og nikkel.⁴⁴ Også konsentrasjonen av kobber og sink i et nærliggende grunnvannstjern var foruroligende høy. Dette var en tilstand en ikke kunne akseptere i fremtiden. Det

nye deponiet, som ble lagt over det gamle, ble derfor designet som et vanntett skjold som dekker hele deponiområdet og hindrer overvann i å trenge ned i de forurensende massene.

Som det fremgår av fig. 48 ligger det flere aktive sperrer i det nye deponiet. I overgangen mellom gammelt avfall og de nye, tilkjørte massene ligger det et 15 cm tykt lag med Blueguard 63. Laget, vil fange opp og nøytralisere eventuelt lekkasjevann som måtte komme i fremtiden. Lekkasjevann med pH > 9 vil perkolere meget langsomt ned i de underliggende, sure massene og sørge for at tungmetaller ikke løses ut og forurenser grunnvannet.

På toppen av deponiet ligger det en pulvremembran av kalsiumbentonitt og Blueguard 63. Det er benyttet 10 cm Blueguard og ca 2 cm bentonitt i membranen. Over membranen ligger det 20 cm stedegne masser som beskytter mot mekaniske påkjenninger og uttørring. Tester utført i Hjerkinns PROs laboratorium viser at membranløsningen er impermeabel, dvs. at den ikke slipper vann gjennom. Den erstatter den membranløsningen som opprinnelig ble foreskrevet av Fylkesman-

⁴⁴ S. Rognerud 2013: Hjerkinns skytefelt 2001 - 2012. Overvåking av metallkonsentrasjoner i bekker, elver og grunnvannsbrønner. Oppdragsrapport.

nen. Pulvermembranen ligger godt selv i 30° skråning og tåler store setninger og strekk-krefter uten å revne. Tester i kryolaboratoriet viser dessuten at membranen er frostsikker.

For å dokumentere at deponiet ikke forurenses omgivelsene er det etablert i alt 7 prøvepunkter. Fire av punktene er miljøbrønner satt ned i grunnvannet. De øvrige er målepunkter i grunnvannsutslag eller grunnvannstjern. Ett prøvepunkt er plassert i et grunnvannsutslag utenfor deponiområdet. Dette punktet benyttes som referanse for bakgrunnsverdiene i grunnvannet. Beliggenheten av prøvepunktene er vist i fig. 50.

Etter som deponiet for sterkt forurensede masser ikke var slutført da rapporten ble skrevet, er analysemateriale foreløpig begrenset. I 2013 ble det tatt kun 2 prøveserier. I tabell 14 er resultatene for analysene tatt 19.08.2013 sammenstilt. Tabellen viser at tungmetallkonsentrasjonen er lav til tross for at mesteparten av deponiet ikke var dekket av pulvermembranen. Blueguardlaget i bunnen dekker imidlertid hele det gamle deponiet, og synes å fungere som forutsatt.

Som tabellen viser er konsentrasjonene av metaller i grunnvannstjernet kraftig redusert siden 2011. NIVA

hadde da en måleserie på samme tidspunkt på sommeren som Forsvarsbyggs prøveserie fra 2013. Da NIVAs prøver ble tatt var de gamle deponimassene enda ikke dekket med Blueguard 63. Det er spesielt interessant at kobberkonsentrasjonen er redusert fra 94,3 µg/l til 1,0 µg/l etter at Blueguard-dekket ble lagt ut. Sinkkonsentrasjonen ble i samme tidsrom redusert fra 164 µg/l til 2,5 µg/l. I grunnvannsbrønnen, hvor NIVA i 2007 målte en pH på 4,33 og en konsentrasjon for kobber, sink og nikkel på hhv. 2 800, 12 000 og 292 µg/l, var verdiene for både pH og tungmetaller i august 2013 på samme nivå som i grunnvannstjernet, dvs. bare ubetydelig høyere enn bakgrunnsverdien. Resultatene tolkes som en klar indikasjon på at det reaktive Blueguardlaget har fungert effektivt som sperre for utlekking fra både gamle og nye deponimasser.

Deponiløsningen som er valgt på Storranden synes å være en svært sikker metode for lokal deponering av tungmetallholdig materiale. Den reaktive cappingen og det reaktive bunnlaget gir en utmerket sikring mot forurensende avrenning i uoverskuelig fremtid. Løsningen med et nytt deponi som skjermer underliggende, gamle forurensninger mot lekkasje åpner for smarte løsninger også andre steder både sivilt og i Forsvaret.

Tabell 14. Analyseresultater fra prøvepunktene ved deponiet på Storranden. Konsentrasjonene er oppgitt i µg/l.

Parameter	Referanse 19.08.2013	Grunnvannsutslag 1 19.08.2013	Grunnvannsbrønn 19.08.2013	Grunnvannstjern 19.08.2013	NIVA Grunnvannstjern 10.08.2011	NIVA Grunnvannsbrønn 10.07.2007
Bly	0,41	14	0,027	0,11	0,18	2,85
Kadmium	<0,004	0,044	0,13	0,005	1,08	2,3
Kobber	5,5	8,3	9,5	1,0	94,3	2 800
Krom	0,56	0,30	0,074	0,11	0,1	2,3
Nikkel	0,26	0,60	0,49	0,57	2,28	292
Sink	0,38	13	17	2,5	164	12 000
Arsen	0,80	1,3	0,053	0,047	-	-
pH	6,2	6,3	6,2	6,8	6,5	4,33

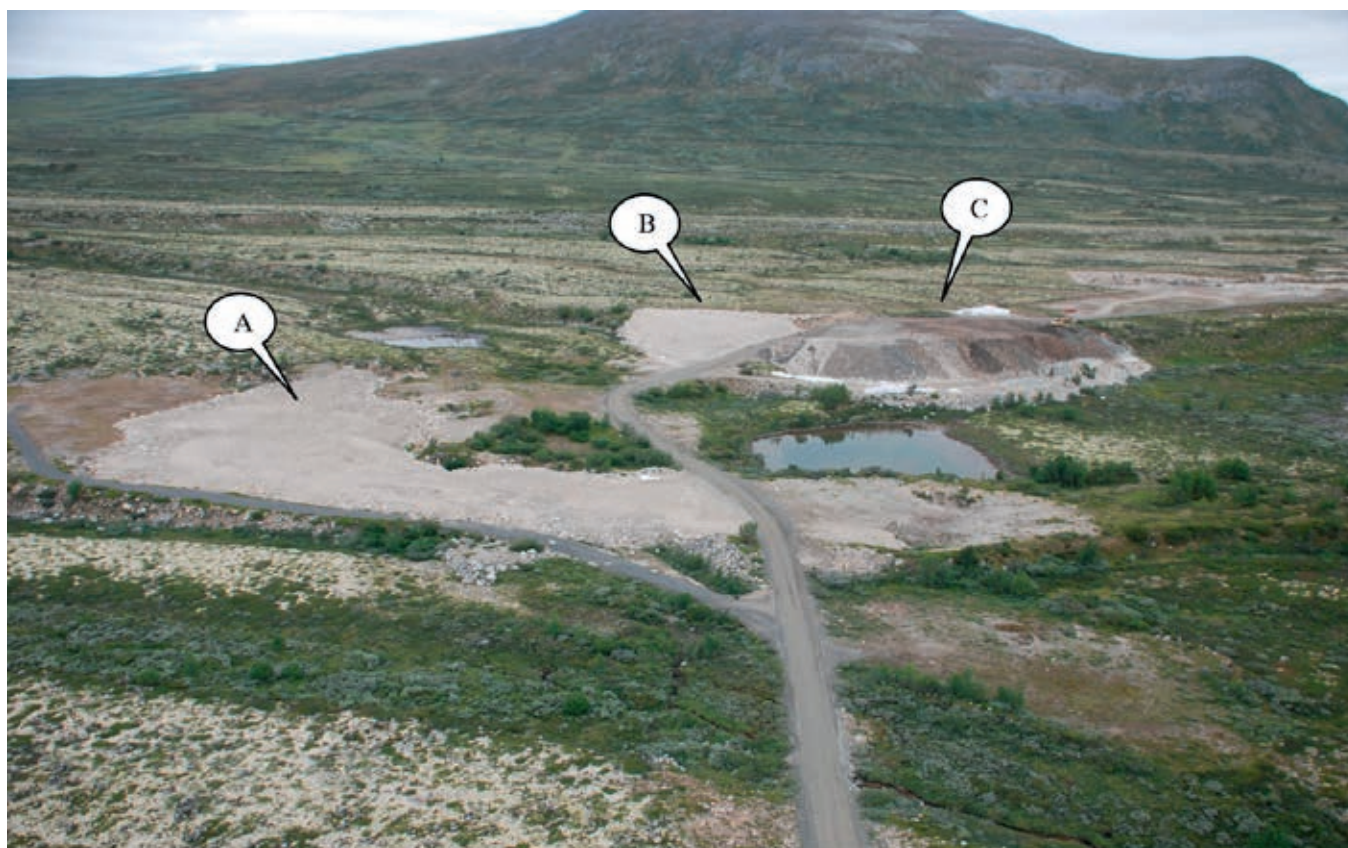


Fig. 49. Deponiområdet på Storranden sett fra luften sommeren 2013. Bare deler av deponiet for sterkt forurensede masser var avsluttet da bildet ble tatt. A = deponi for rene masser, B = avsluttet deponi for sterkt forurensede masser, C = deponi for sterkt forurensede masser under oppbygging.



Fig. 50. Utlekkingen av bentonitt ble gjort med helikopter. (Foto Svein Solli).



Fig. 51. De 7 prøvetakingspunktene ved deponiet for sterkt forurensede masser. Fire av punktene (grønne) er miljøbrønner satt ned i grunnvannet, to (røde) er grunnvannsutslag og én (blå) er brønn for måling av bakgrunnsverdier.

RENSELØSNINGER BRUKT I REGIONFELT ØSTLANDET OG RENA LEIR

Ved utbyggingen av Rena leir og RØ ble for første gang potensielle, fremtidige forurensningsproblemer satt på agendaen. Under planleggingen av Rena leir ble det bl.a. utarbeidet egen georessursplan hvor løsmassenes evne til å binde forurensninger, inklusive tungmetaller, var ett av temaene.⁴⁵ Også ved planlegging og utbygging av RØ var tungmetallavrenning tema, spesielt i tilknytning til de naturlige forekomstene av bly og andre tungmetaller i Deifjellet, Ørnhaugen og Styggdalshaugen.

I RØ innså en tidlig at de naturgitte forhold for tilbakeholdelse av tungmetaller var dårligere enn i det gamle skytefeltet på Hjerkin. Fjellgrunnen i RØ domineres av sure, kvartsittiske bergarter og konglomerater i motsetning til de basiske bergartene på Hjerkin. De sure bergartenes negative innvirkning på bindingspotensialet for tungmetaller avspeiles også i løsmassene. I tillegg er store deler av feltet dekket av myr med avrenning av humussyrer og organiske forbindelser som lett danner kompleksbindinger med tungmetaller. Kompleksbindingene følger vannstrømmen og kan over tid bidra til at konsekvensvilkårene blir vanskelig å overholde.

Fokus på naturlige forekomster av tungmetaller i RØ var hovedgrunnen til at den høye blykonsentrasjonen i en mørk skifer i Deifjellet ble avdekket på et tidlig tidspunkt, før alvorlige forurensningsproblemer oppsto. Også tungmetallene i Styggdalshaugen, hvor ammunisjonslageret ble bygd, ble påvist før anleggsarbeidet startet, og klare planer for hvordan de tungmetallholdige fjellmassene skulle håndteres ble utarbeidet.

Grunnlaget for de fleste renseløsningene som er beskrevet for tungmetallavrenningen i Hjerkin skytefelt og ved Tverrfjellet gruve ble lagt i RØ. De første deponiene med reaktivt bunnlag ble bygd her. Også det første kontaktfilteret for tilbakeholdelse av tungmetaller så dagens lys i RØ. Da det oppsto erosjons- og rikosjettproblemer i tilknytning til de tradisjonelle skytevollene ble dekkklipp for første gang introdusert som et potensielt fangmateriale. Det var også i RØ at dekkklippets evne til å binde tungmetaller først ble påvist.



Fig 52. Svartskiferen i Deifjellet inneholder høye konsentrasjoner av bly. Den grå kvartsitten som omgir skiferen er imidlertid ren.

I de følgende avsnitt er de løsningene som ble designet og bygd i Rena leir og RØ i anleggsperioden beskrevet. For å unngå gjentakelser er parallell-løsninger til Hjerkin ikke tatt med.

DEPONIENE FOR TUNGMETALLHOLDIG MATERIALE I DEIFJELLET OG STYGGDALEN

Under en rutinekontroll av pukk produsert av kvartsitten i Deifjellet ble det avdekket at det knuste materialet hadde til dels meget høye blyverdier. Ved nærmere undersøkelse av fjellveggen ble blyet lokalisert til en mørk skifer som lå innbakt i den sterkt tektoniserte kvartsitten.

Opprinnelig var det forutsatt at all sprengstein i Tverrfjellet skulle pukkes. Etter påvisningen av bly ble det imidlertid besluttet at svartskifer med blykonsentrasjon

⁴⁵ T. Østeraas 1995: Georessursplan for Forsvarets anlegg på Rena. Interconsult oppdragsrapport.

over 60 mg/kg skulle legges på deponi og ikke brukes i pukkprodukter. Fylkesmannen i Hedmark aksepterte lokal deponering av det blyholdige materialet forutsatt at deponiet ble plassert i direkte tilknytning til uttaksområdet og at det ble sikret mot avrenning. Et forslag om bygging av et lukket deponi med olivin 11 som reaktivt bunnlag og tett morene som toppdekke ble godkjent av Fylkesmannen. Som nevnt i et tidligere avsnitt ble olivin valgt både pga. lav permeabilitet og fordi mineralet kom best ut som rensemiddel i en undersøkelse utført av Forsvarsbygg Utvikling i samarbeid med NTNU.

Fig. 53 viser et tverrsnitt av deponiet som senere ble modell for andre deponier i RØ, Rena leir og på Hjer-

kinn. For å avklare om det reaktive bunnlaget tilfredstilte kravet om full tilbakeholdelse av utløste tungmetaller, ble deponiet fulgt opp gjennom en treårsperiode. Prøvetaking ble imidlertid umulig å gjennomføre da det aldri ble registrert vann i prøvetakingskummene. Dette var en klar indikasjon på at morenedekket på toppen av deponiet var så tett at overflatevannet rant av uten å infiltrere. Hvis noe slapp gjennom ble dette fanget opp av det reaktive bunnlaget og transportert videre ned i fjellsprekker under deponiet. For å kontrollere om grunnvannet var påvirket av eventuell lekkasje ble det etablert fire prøvetakingsbrønner nedstrøms deponiet. Gjennom prøvetakingsperioden ble det aldri påvist forhøyede verdier av tungmetaller i brønnene.

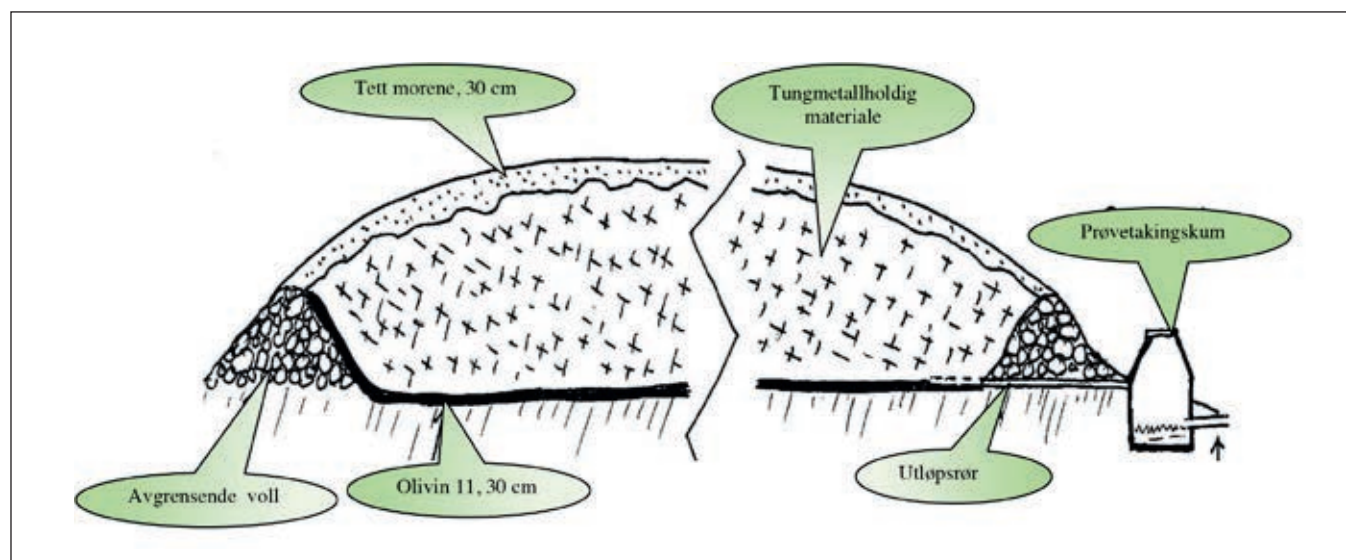


Fig. 53. Tverrsnitt av deponiet ved skyteveggen i Deiffellet. Deponiet ble modell for alle de andre deponiene i RØ, Rena leir og Hjer-



Fig. 54. Deponiet i Deiffellet etter at toppdekket med tett morene var lagt på. Totalt ble det lagt 5 000 m³ blyholdig masse i deponiet. Gjennomsnittlig blyinnhold i svartskiferen var > 500 mg/kg.



Fig. 55. Fjellhallene for ammunisjonslageret i Styggdalshaugen under utsprenning. Deponiområdet for blyholdig materiale er ringet inn med rødt.

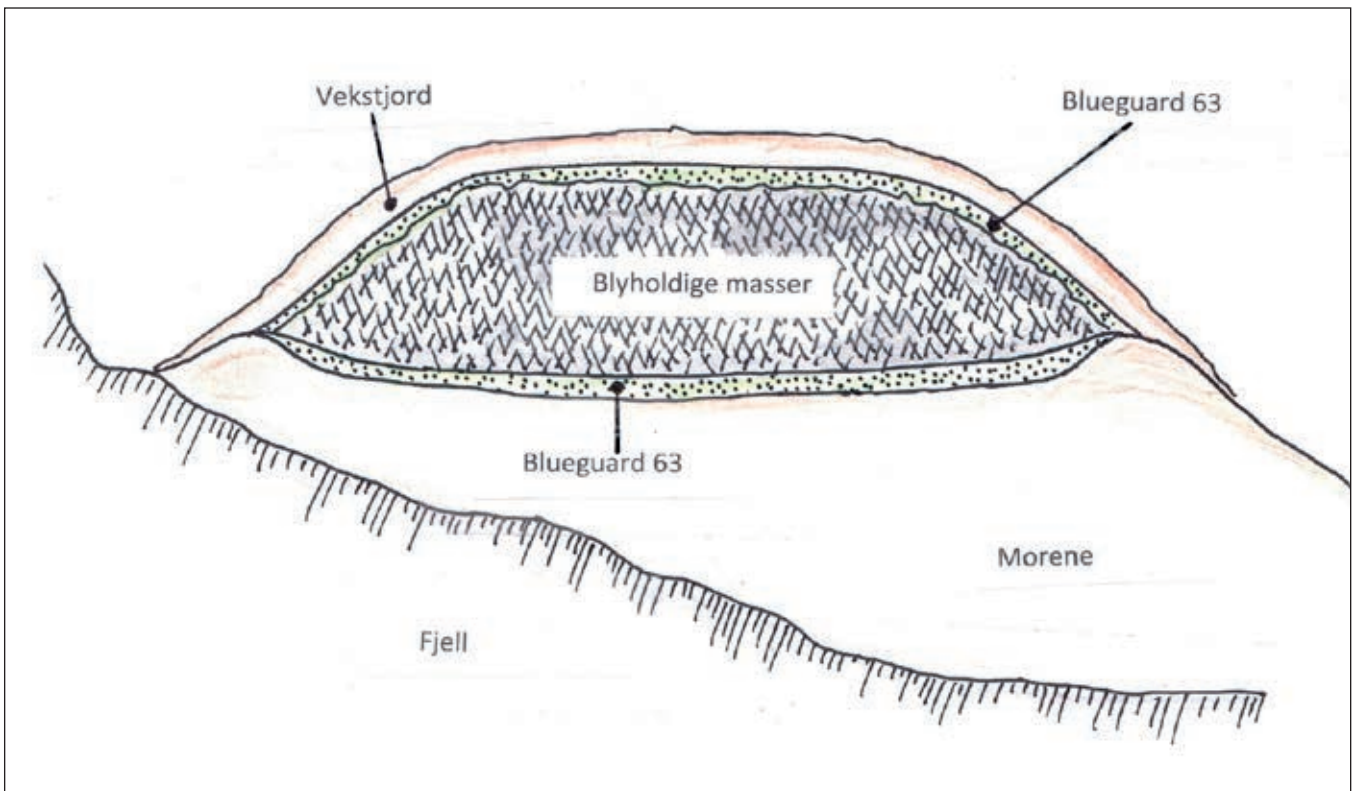


Fig. 56. Snitt gjennom deponiet ved ammunisjonslageret i Styggdalen. Deponiet er enda bedre sikret enn Deifjelldeponiet fordi det er blåst et lag med olivin over de blyholdige massene før toppdekket av morene og vekstjord er lagt på plass.



Fig. 57. Olivinlaget på toppen av Styggdalsdeponiet ble blåst ut direkte fra tankbil. Metoden er velegnet for utlegging av olivin på skytevoller, men er tidkrevende og tungvint ved utlegging av tykke lag på store flater. Metoden som er vist på fig. 58 er mer hensiktsmessig og sikker.



Fig. 58. Bildet viser utlegging av olivindekke på deponiet på Storranden. Storsekkene settes ut med intern avstand som avpasses etter hvor tykt olivinlaget skal være. Sekkene spjæres og olivinen jevnes ut med doser.

Da utsprengningen av fjellhallene for ammunisjonslageret i Styggdalshaugen ble igangsatt, støtte en nesten umiddelbart på en glinsende, svart skifer med et blyinnhold på opp til 3 g/kg. Da forundersøkelsene hadde vist at blyholdig fjell sannsynligvis ville bli et problem, var et egnet deponiområde i direkte tilknytning til anlegget allerede klargjort for bruk. Deponiet ved Deifjellet ble brukt som modell, men i tillegg ble det blåst ut et olivinlag over de blyholdige massene før toppdekket av morene og vekstjord ble lagt ut. Formålet med olivinlaget på toppen var å øke pH i overvannet som eventuelt infiltrerte i massene. pH-heving var ønskelig da svartskiferen var svært sur ($\text{pH} < 3,5$). Etter som olivin har en nøytraliseringsevne som er dobbelt så høy som for kalk var valget enkelt. For første gang ble også en mulig stabiliseringsgevinst på tungmetallene vurdert som sannsynlig fordi reaktive olivinpartikler ville følge sigevannet ned i deponiet.

I likhet med Deifjelldemoniet var det ikke mulig å teste funksjonen av Styggdalsdeponiet da det aldri var vann i prøverørene. Dette ble imidlertid tatt som et godt tegn på at topplaget var tett og at overvann aldri trengte ned i de blyholdige massene.

DEPONIET FOR SKYTEVOLLMASSER I RENA LEIR

På grunn av alvorlige rikosjettproblemer fra skytebanene i Rena leir ble det besluttet å erstatte den åpne voll-løsningen med overbygde fangvoller. I tillegg ble det vedtatt å erstatte de minerogene massene i vollene med dekk-klipp. Dekk-klipp ble valgt både på grunn av de gode rikosjettegenskapene og fordi dekkklippet reduserer

fragmenteringen av prosjektilene.⁴⁶ Løsningen ble vurdert som både rikosjett- og avløpsfri.

De minerogene massene som ble skiftet ut inneholdt store mengder bly, kobber og antimon. Totalvolumet på massene var ca 1000 m³. Hovedbestanddelen var kvartssand med middelkornstørrelse ca. 2 mm. Sanden inneholdt følgende mengder tungmetaller etter 13 års skyting:

Bly:	14 g/kg sand, totalt 21 tonn.
Kobber:	8 g/kg sand, totalt 12 tonn.
Antimon:	1,8 g/kg sand, totalt 2,5 tonn.
Sink:	1,4 g/kg sand, totalt 2,1 tonn.

Klif, som forurensningsmyndighet, mente i utgangspunktet at sanden burde kjøres til deponi for farlig avfall, men godtok senere lokal deponering under forutsetning av at sikringen mot avrenning av tungmetaller ble minst like god som ved avhending på deponi for farlig avfall. Erfaringene fra Deifjelldemoniet og Styggdalsdeponiet ble lagt til grunn ved prosjekteringen av deponiet, som er vist som skisse i fig. 59.

Som det fremgår av figuren har deponiet tredobbel sikring mot inntrengning av overflatevann gjennom toppdekket. Det øverste sandlaget beskytter mot mekaniske skader på underliggende bentonittmembran og avleder dessuten mesteparten av overvannet. Som det fremgår av fig. 60 er sanden ingen ideell løsning da den er enskornig og erosjonssvak. For tilsvarende løsninger senere bør det benyttes erosjonssterke masser, fortrinnsvis stein- og blokkfri bunnmorene.

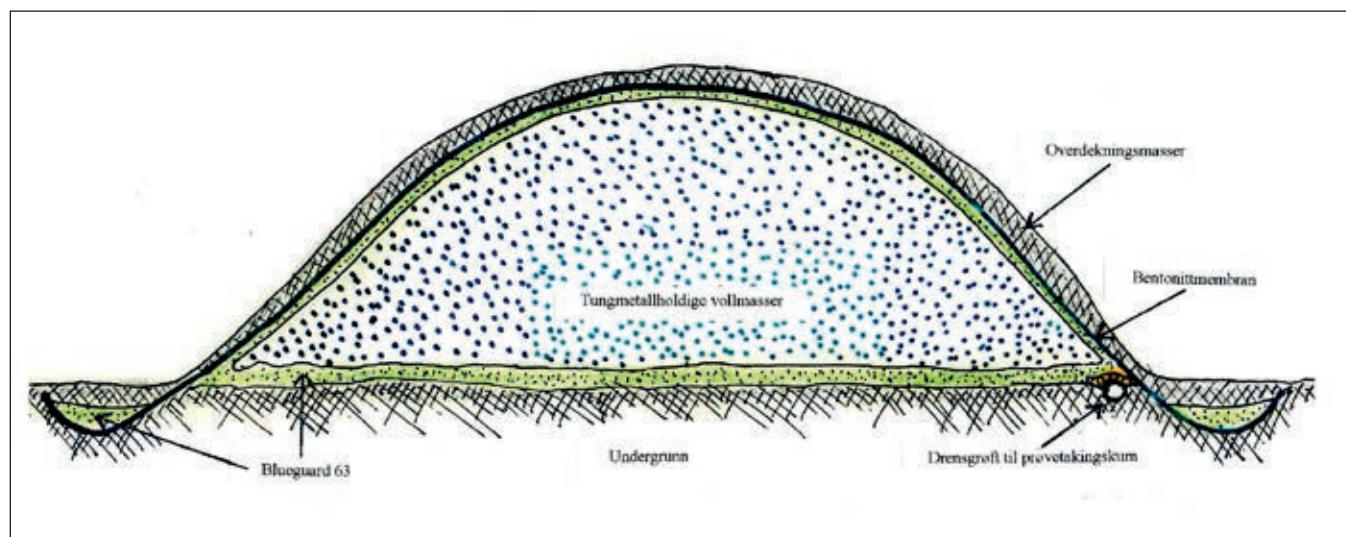


Fig. 59. Skisse av deponiet i Rena leir. Deponiet er en sikker, lokal løsning som er kostnadseffektiv og sparer miljøet for transportforurensninger. Løsningen er imidlertid ikke i henhold til deponiforskriften.



Fig. 60. Deponiet for fangvollmasser i Rena leir. Det er benyttet ensgradert sand som dekkmasser. Da sanden er erosjonssvak er den dårlig egnet til dette formålet. Den gule pilen peker på erosjonsskader etter en nedbørsepisode.

Det er benyttet bentonittmembran som tetningssjikt i deponiet. Pulvermembranen som ble brukt på Storranden i Hjerkinnskytefelt var ikke utviklet enda da deponiet i Rena leir ble bygd. Bentonittmembran er en akseptert løsning for deponier som skal sikres gjennom en lang tidsperiode. Den er imidlertid ikke like sikker som en pulvermembran fordi tetningssjiktet er svært tynt. Plastmembraner frarådes da holdbarheten over lang tid er uklar.

I leggeanvisningen for bentonittmembran foreskrives det utrulling på en pute av sand for ikke å skade fiberduken. I stedet for sand ble det på deponiet i Rena leir benyttet 10 cm Blueguard 63. Derved fikk en kombinert både beskyttelse av duken og en reaktiv barriere som trer i funksjon ved eventuelle dukskader.

Deponiet i Rena leir er et godt eksempel på en miljøvennlig, lokal deponering som ikke lekker tungmetaller til omgivelsene. Med den tredoble sikringen mot inn-trengning av overvann, inklusive en membran som ikke brytes ned over tid, er faren for lekkasje minimal i all overskuelig fremtid.

REAKTIV BARRIERE MOT FRANGIBELT STØV I RENA LEIR

Etter som frangibel ammunisjonen er tatt i bruk også i

Østerdalen garnison, ønsket en å tilpasse én av banene i Rena leir til forurensningsproblemene som kan oppstå. Frangibel ammunisjon pulveriseres fullstendig ved bruk og etterlater et pulver med meget høyt kobberinnhold. I forhold til tradisjonell ammunisjon øker pulveret potensialet for avrenning både av løst og partikkelbundet kobber.

Det finnes flere måter å løse avrenningsproblemene fra frangibel ammunisjon på, men de fleste krever tette flater med oppsamling av støvet og rensing av avløpsvannet. Dette er komplisert og kostbart. På Rena ønsket en å prøve en enklere løsning hvor det tungmetallholdige vannet fra frangilpulveret renses ved at det siver gjennom et lag med reaktivt materiale. For å klarlegge om prinsippet ville fungere i praksis ble en reaktiv barriereløsning testet av Forsvarsbygg utvikling.⁴⁷

For å få klarhet i hvilken tungmetall-lekkasje en kan forvente fra frangilpulveret ble det foretatt en ristetest av en prøve fra skytehuset i Rena leir. Som tallene i tabellen nedenfor viser er kobber det dominerende metallet som lekker ut fra støvet. Noe overraskende er det at støvet også inneholder andre tungmetaller. Konsentrasjonene er imidlertid så lave at de ikke skaper avrenningsproblemer.

⁴⁶ Dekk-klippets egenskaper som rikosjett- og fragmenteringsdempende medium behandles i annet avsnitt i rapporten.

⁴⁷ T. Østeraas 2013: Forsøk med binding av kobber fra frangibel ammunisjon på bane 2, Rena leir. Fagrapport Forsvarsbygg utvikling.

Tabell 15. Resultatet av ristetest på frangibelt pulver fra skytehuset i Rena leir. Alle verdier er i µg/l. Det er kun kobber som har så høy konsentrasjon at avrenningsproblemer kan oppstå.

Arsen (As)	0,22
Bly (Pb)	2,80
Kadmium (Cd)	0,06
Kobber (Cu)	2 200
Krom (Cr)	0,09
Nikkel (Ni)	7,90
Sink (Zn)	100

Ved valg av reaktivt materiale til barrieren ble det stilt flere krav som måtte være oppfylt for at det skal kunne brukes til formålet:

1. Materialet måtte ha like høy eller høyere permeabilitet enn løsmassene på banen. Høy permeabilitet er nødvendig for å sikre at overvannet ikke stuves opp på overflaten.
2. Materialet måtte være kommersielt tilgjengelig i tilstrekkelige mengder til en akseptabel pris.
3. Renseeffekt for tungmetaller, spesielt kobber, måtte være god.
4. Materialet måtte være robust mot mekanisk påkjenning og kjemisk forvitring. Materiale som er mettet med tungmetaller må f.eks. kunne utsettes for sur nedbør uten at metallene lekker ut igjen.

Med utgangspunkt i kravene over ble en stående ved Blueguard G 1-3 som det mest aktuelle produktet for uttesting. Blueguard G 1-3 er et granulat som har tilfredsstillende permeabilitet og dokumentert renseeffekt på tungmetaller. Det utelukkes ikke at det finnes andre produkter i markedet som også tilfredsstiller kravene, men på grunn av tidspresst valgte en et produkt som allerede var godt kjent bl.a. fra bruk på Hjerkin.

Første trinn i utprøvingen var å klarlegge om granulatet var egnet til formålet. Dette ble gjort med en enkel kolonnetest hvor lekkasjevann fra frangilpulver ble brukt som testvann. Resultatene av testen er vist i tabell 16.

Tabell 16. Resultatet av kolonnetest med Blueguard G 1-3 og lekkasjevann fra frangilpulver.

Parameter	Konsentrasjon før rensing	Konsentrasjon etter rensing	Renseeffekt
Cu	2 200	260	88 %
Zn	100	1,5	98 %
Ni	7,9	0,96	88 %

Tabellen viser at Blueguard G 1-3 er et effektivt filtermedium for tungmetaller fra frangilpulver.

For å klarlegge hvordan barriereløsningen ville fungere i praksis, ble det gjennomført lysimeterforsøk i laboratoriet på Hjerkin. Lysimeteret ble satt opp som følger fra topp til bunn:

- Frangilstøv tilsvarende ca 3 kg/m²
- Masser fra bane 2, Rena leir med lagtykkelse på 15 cm
- Reaktivt granulat med lagtykkelse 2 cm
- Masser fra bane 2, Rena leir med lagtykkelse ca 15 cm.

Lysimetrene ble belastet med springvann som ble tilført gjennom forstøvende dyser.

Tilført vannmengde pr simulert år var 800 mm. Det ble simulert både regnskurer og sammenhengende regn samt tørkeperioder. Vinterhalvåret ble simulert med sammenhengende 15° kulde og sommeren med temperaturer opp til + 25°. 2 sommersesonger og 1 vintersesong ble simulert. Resultatene etter avsluttet test er vist i tabell 17.

Tabell 17. Renseeffekt i lysimeter med reaktiv barriere for avrenning fra frangibelt pulver. Konsentrasjonene er i µg/l. Konsentrasjon etter passering av barrieren er korrigert for renseeffekten i dekkmassene fra bane 2 i Rena leir.

Parameter	Konsentrasjon i innvannet	Konsentrasjon etter passering av barriere	Renseeffekt
Cu	2 200	43,8	98 %
Zn	100	1,6	98 %
Ni	7,9	0,42	95 %

Som tabellen viser var resultatene av forsøkene svært tilfredsstillende, og løsningen ble besluttet bygget som fullskala anlegg på bane 2. Banen fikk en renseløsning som var rask å bygge og er svært enkel å drifte og vedlikeholde. En skisse av løsningen er vist i fig. 61. Fig. 62 viser løsningen under bygging.

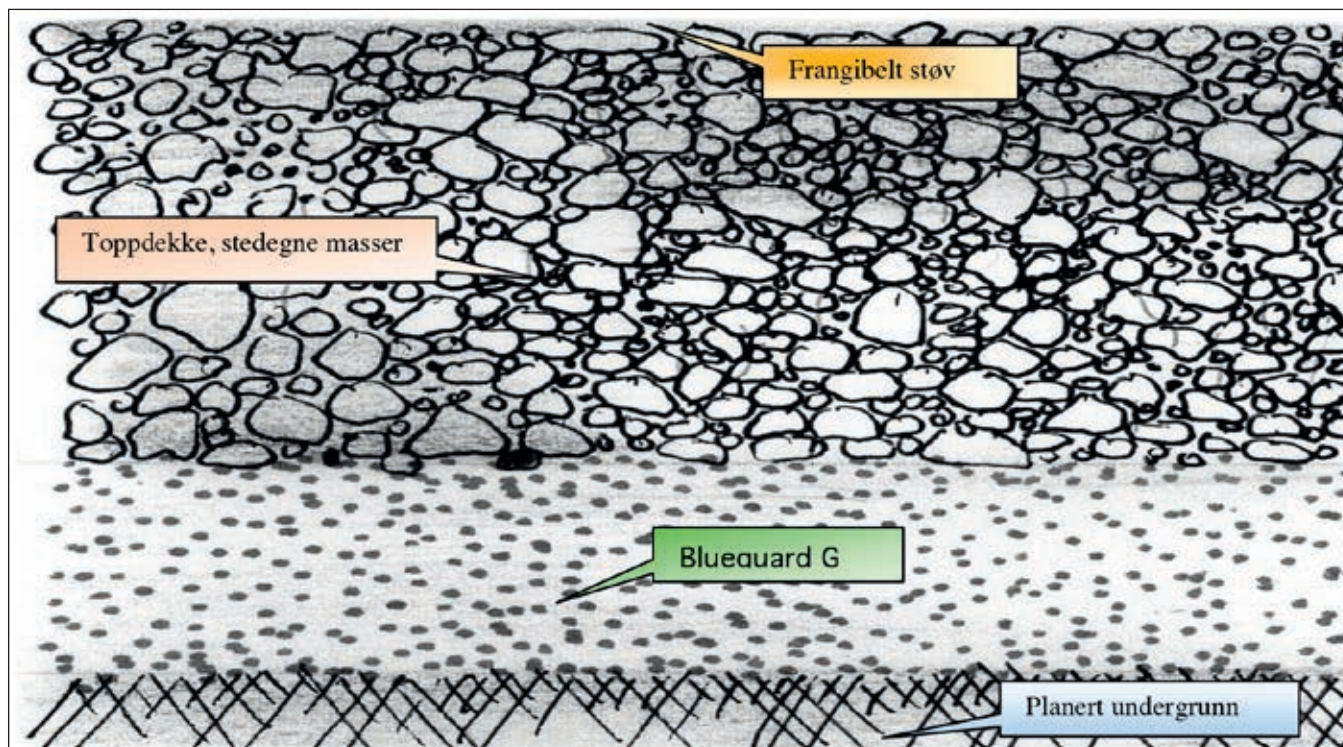


Fig. 61. Snitt gjennom den reaktive barriereløsningen for frangibelt støv som ble valgt for bane 2 i Rena leir.

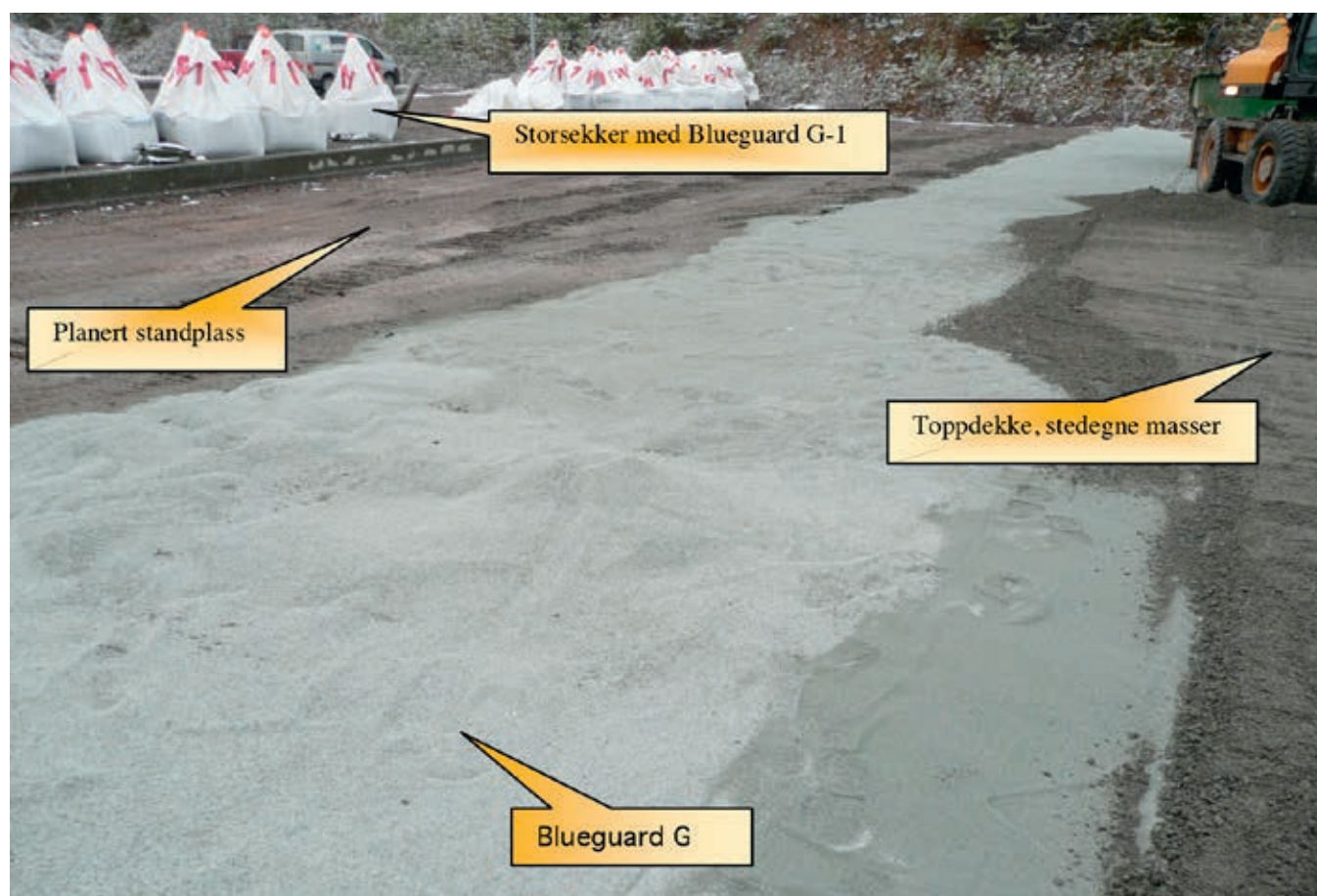


Fig. 62. Fra oppbyggingen av den reaktive barrieren på bane 2. (Foto Helge Indset)

BRUK AV DEKK-KLIPP SOM SIKRING MOT EROSJON OG AVRENNING FRA SKYTEVOLLER

I RØ er det i alt ca 110 skytevoller i de ulike aksene. Flere av vollene var så sterkt erodert allerede etter et par års bruk at de måtte repareres. Årsaken til skadene var at morenen som er benyttet ved oppbygging av vollene er et stivt materiale med dårlig energiabsorberende evner. Ved prosjektilanslag kastes materialet til sidene og slaghull oppstår i fronten av vollene (se fig. 63). For å redusere skadene var det aktuelt å dekke vollene med et erosjonssterkt materiale som nøytraliserer kreftene fra prosjektilanslagene.

I tillegg til erosjonsproblemene gir de stein- og blokk-rike morenemassene også høy frekvens av rikosjetter og fragmentering av prosjektiler. Begge deler øker faren for avrenning av tungmetaller, både på grunn av ukontrollert spredning av prosjektilrester i terrenget og økt lekkasje fra vollene.

For å redusere problemene med erosjon, fragmentering og spredning av prosjektilrester foretok Forsvarsbygg utvikling en vurdering av forskjellige typer dekkmateriale som kunne være aktuelle å bruke på vollene. De innledende forsøkene ble lagt til bane 4 i Rena leir. Dekkmaterialene som ble testet var løs Leca, 0-2 mm olivin, dekk-klipp, sagflis og kutterspon i tillegg til ensgradert kvartssand. I forsøkene ble det kun brukt håndvåpen-ammunisjon. Etter en samlet vurdering kom dekk-klipp ut som en klar vinner. Dekk-klippet har meget god erosjonsbestandighet både mot vær og vind og hard skytebelastning. Senere forsøk dokumenterte også dekk-klippets gode rikosjettdempende egenskaper og evnen til å redusere fragmenteringen av prosjektiler. De positive resultatene var den direkte årsaken til at fullskala anlegg med dekk-klipp ble bygget både i RØ og Rena leir.

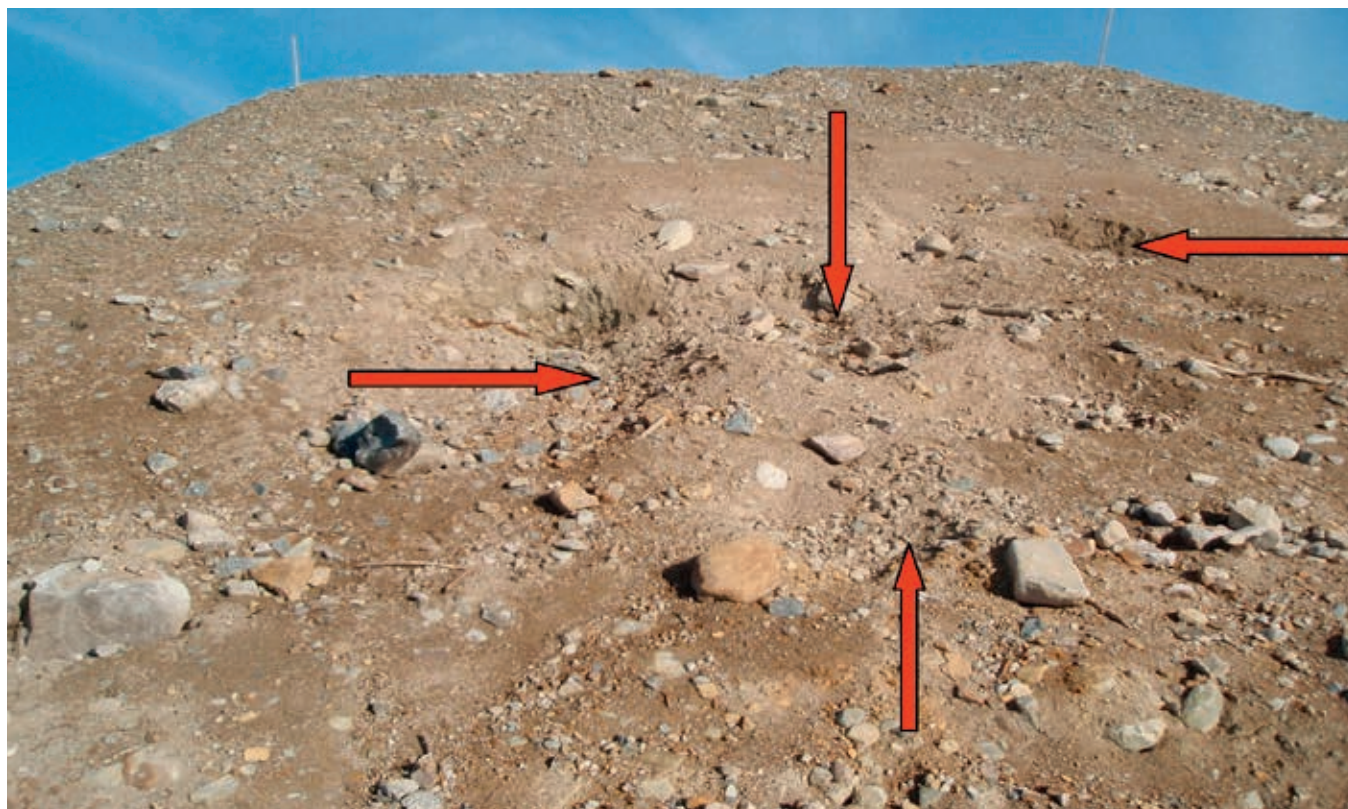


Fig. 63. Overflaten av skytevoll i RØ etter ett års bruk. Erosjonsskadene er store (røde piler). Det ble funnet store mengder fragmenterte prosjektiler i gropene.



Fig. 64. Kraftig erosjon i fronten av skytevoll i RØ etter sterk nedbør. I tillegg til de fysiske skadene medfører erosjonen også lekkasje av tungmetaller med erosjonsvannet.

De første forsøkene med erosjonsbeskyttelse ble lagt til en sterkt belastet skytevoll i RØ. Før tiltaket ble iverksatt ble treffområdet i vollen undersøkt, og en fant at en stor del av prosjektilene var fragmentert med høy risiko for lekkasje av tungmetaller. Lekkasjen ble bekreftet i et vannsig ved foten av vollen hvor det ble målt en kobberkonsentrasjon på 14 µg/l, mens bakgrunnsverdien i området var < 2 µg/l. Også faren for spredning av fragmenterte prosjektiler til områdene bak vollen ble vurdert som meget stor fordi løsmassene i vollen besto av morene med høyt steininnhold. Konklusjonen på undersøkelsen var at vollen, i likhet med mange av vollene i RØ, representerer en betydelig kilde for avrenning av kobber til nærområdene. Over tid kan avrenningen også medføre forhøyede verdier i bekker og vannsig. Tiltak for å begrense problemene ble vurdert som nødvendig, og utlegging av dekk-klipp som fangmedium ble vedtatt som en forsøksordning, primært for å redusere erosjons-skadene. På grunn av de strenge restriksjonene som er lagt på bruk av dekk-klipp av miljøvernmyndighetene, ble kun én voll behandlet i første omgang.

For å teste dekk-klippets erosjonsdempende egenskaper ble treffområdet på forsøksvollen jevnet ut og dekk-

ket med multiklipp slik som vist i fig. 65. Tykkelsen på dekk-klippet varierte fra ca 1 m i det sentrale området til 0 ut mot kantene med en gjennomsnittstykkelse på 0,5 m. Utleggingen ble gjort med gravemaskin.

Etter at dekk-klippet var lagt ut, ble skytingen gjenopptatt med samme frekvens og samme type ammunisjon som tidligere. I hovedsak ble det brukt finkalibret ammunisjon opp til 7,62 mm. Dekk-klippet førte til en drastisk reduksjon i erosjonen, og reparasjon av vollen har ikke vært nødvendig etter at utleggingen fant sted i 2007. Noe dekk-klipp er kastet ut fra de hardest belastede treffområdene, men omfanget er svært begrenset.

Parallelt med forsøkene i RØ ble det også gjort erosjonsdempende forsøk på en skytevoll på testanlegget for Nammo Raufoss AS på Bradalsmyra. I disse forsøkene, som var et samarbeidsprosjekt mellom Nammo og Forsvarsbygg utvikling ble multiklippet blandet med 0 - 3 mm olivinsand med blandingsforholdet 50/50 (volum %). I tillegg til å klarlegge dekk-klippets erosjonsdempende egenskaper ønsket en også å belyse følgende problemstillinger:

1. I de gamle anleggene var støvplagen et vesentlig HMS-problem. Kan støvplagen og faren for utvikling av silikose for driftspersonellet reduseres ved å benytte dekk-klipp i stedet for kvartssand i skytevollene?
2. Kan bruk av dekk-klipp redusere fragmenteringen av prosjektilene så mye at resirkulering blir mulig i fremtiden?
3. Kan innblanding av olivin i dekk-klippet medføre at tungmetaller som lekker ut fra fragmenterte prosjektiler bindes?

Ved anleggene på Bradalsmyra skytes det med alle typer ammunisjon opp til 30 mm granater i én og samme voll. Det ble raskt klart at multiklippet har for lav egenvekt til å motstå energien i den tyngste ammunisjonen. Ved anslag kastes gummibiter til side og vollen eroderes forholdsvis raskt. Løsningen kan i følge Nammo være å endre blandingsforholdet mellom olivin og dekk-klipp og bytte ut multiklipp med enkeltklipp. Prosjektet er foreløpig lagt på is og endelige konklusjoner foreligger derfor ikke. For øvrig rapporterte Nammo at støvproblemet ble vesentlig mindre ved bruk av fangvoller med olivin og dekk-klipp i stedet for tradisjonelle sandvoller. Faren for silikose er eliminert i og med at olivinstøvet ikke inneholder kvarts.

Etter som forsøkene ved Nammo ikke ga svar på spørsmålene om rikosjetter og fragmentering, ble disse temaene tatt opp i egne forsøk utført ved FFI og i Rena leir. Erfaringer fra en rekke anlegg viser at det i praksis ikke er mulig å unngå rikosjetter når det benyttes minero-gent materiale i skytevollene. Selv ved bruk av steinfri sand oppstår det rikosjetter. Problemet er særlig stort når vollmaterialet fryser. I frossen tilstand kan vanlig sand få en hardhet som er tilnærmet lik betong. Dette øker rikosjettfaren betydelig samtidig som fragmenteringen av prosjektilene øker. Det er derfor åpenbart at rikosjettproblemet alltid vil være til stede så lenge en bruker sand som vollmateriale.

Etter som multiklipp i de innledende forsøkene viste at rikosjett- og fragmenteringsproblemet sannsynligvis var lite, ble FFI engasjert for å verifisere dette gjennom en testskyting ved instituttets ballistiske laboratorium. Skytingen ble gjort med AG3 og NM 231 ammunisjon. I Rapporten fra FFI heter det:

- *Skyting i rett vinkel. Det ble skutt 6 skudd med svært konsistent resultat. Alle prosjektilene stoppet etter 50 – 63 cm inntrengning. Kulene var noe deformert, men mantelen var hel og begge kjernene var på plass. Det var ingen rikosjetter.*
- *Skyting på skrå. Det ble skutt 5 skudd i 30 grader og 5*



Fig. 65. Utlegging av multiklipp på skytevoll i RØ. Utleggingen var en meget enkel prosess.

skudd i 15 grader. Ingen av skuddene ga rikosjetter og prosjektilene gikk tilsynelatende rett frem i gummien. Prosjektilene var noe deformerte.

- Skyting mot frossen masse. Det ble skutt 2 skudd i 15 graders vinkel mot en blokk bestående av frosset vann og dekk-klipp. Begge prosjektilene gikk i oppløsning ved at mantelen ble strippet av og alle tre delene (spiss, kjerne og mantel) rikosjettete fra overflaten.

«Gummimassen viser meget bra egenskaper både med hensyn til stoppeevne og evne til å unngå rikosjetter så lenge massen er frostfri. Ved skyting mot frossen masse er resultatene ikke tilfredsstillende da prosjektilene ble ødelagt og rikosjettete».

Problemet med rikosjetter og fragmentering ved skyting på frossen gummimasse er i praksis lite relevant. På grunn av det store porevolumet og den høye permeabiliteten renner vannet tvers gjennom gummimassen. Dekk-klipp som har ligget åpent til for vær og vind i RØ viser f.eks. ingen tegn til vannakkumulasjon eller isdannelse vinterstid. Isdannelse i dekk-klipp vil derfor neppe bli et problem selv etter kraftig regnvær eller snøsmelting med påfølgende frost.

For ytterligere dokumentasjon av dekk-klippets egenskaper som vollmateriale ble det gjennomført en testskyting mot et prøvefelt med dekk-klipp på bane 2 i Rena leir.⁴⁸ Følgende problemstillinger ble undersøkt:

1. Gummiens stabilitet mot utglidning ved lagringsvinkel opp til 45° og konsentrert skyting mot en liten treffsone.
2. Fragmentering og støvdannelse ved prosjektilanslag i gummien.
3. Dannelse av metallstøv (kobber) i treffsonen ved prosjektilanslag.
4. Mulighetene for å skille prosjektiler og gummi fra hverandre med tanke på resirkulering.

I tillegg til punktene over ble det også gjort en vurdering av de helsemessige sider ved bruk av dekk-klipp i skytevoller. Gummistøv fra veier har vært i søkelyset i forbindelse med astma- og allergiproblemer. Tilsvarende problemer kan tenkes å oppstå ved utstrakt bruk av dekk-klipp i skytevoller.

Dekk-klipp har ingen definert rasvinkel slik som kvartsand eller andre mineralske materialer. Dette skyldes først og fremst gummiflakenes form og overflatekarakter som gir høy, intern friksjonskoeffisient. Som beskrevet

i avsnittet «Dekk-klippets fysiske egenskaper» kan dekk-klipp stå i tilnærmet vertikal vegg. Etter som testresultatene fra FFI viser at dekk-klipp er tilnærmet rikosjettfri helt ned mot 15° skråningsvinkel er det imidlertid ingen grunn til å bygge voller med større skråningsvinkler enn 30 - 45°. Det var likevel behov for å få dokumentert at gummien ikke sklir ut ved konsentrert skyting ved store skråningsvinkler. For å klarlegge dette ble det gjennomført skyting mot en liten testflate med 45° skråningsvinkel som ble bygget opp på bane 2. 1000 skudd med NM 231-ammunisjon ble avfyrt mot et sirkulært felt med $\varnothing \approx 20$ cm. En svak kavitering ble registrert i gummien etter noen titalls skudd. Kaviteringen opphørte etter hvert. Etter 1000 skudd var dybden på anslagsgropa 12 cm. Dybden ble målt som avstanden mellom den opprinnelige overflaten og bunnen på gropa. Kaviteringen skyldtes først og fremst sammenpakking av gummien i anslagsområdet. Svært lite materiale ble kastet ut av gropa ved anslag.

Det ble ikke registrert noen tegn til utglidning av gummimassene som følge av skytingen. Tvert i mot virket gummimassene i gropveggen fastere og mer stabile enn omgivende gummi.

Fragmentering og støvdannelse i dekk-klippet kan øke brannfaren samtidig som faren for rikosjetter og tungmetallavrenning sannsynligvis øker. Gummien i dekk-klipp er imidlertid en seig masse som kan rives i stykker ved prosjektilanslag, men knuses ikke slik som for eksempel kvarts. Det var derfor antatt at støvproduksjonene er liten, spesielt sommerstid hvor gummien er relativt myk.

Etter prøveskyting med 1000 skudd ble omfanget av fragmentering og støvdannelse i treffområdet registrert. Fig. 67 viser at dekk-bitene kan skytes i stykker etter lang tids bruk. Massene får et luftig preg særlig på grunn av tekstilene som blir revet opp og danner ulllignende dotter. Dottene veves etter hvert sammen og fungerer som et filter som reduserer utkasting av støvpartiklene. Dottene har lav antennelsestemperatur i tørr tilstand hvilket kan medføre brann ved bruk av sporlysammunisjon.

Ved skyting mot en avgrenset anslagssone i vollen blir konsentrasjonen av prosjektiler i gummien etter hvert høy. Antall prosjektiler som treffer andre prosjektiler økte tilsvarende. Kollisjonen kan medføre at metallpartikler rives løs fra prosjektilene og avleires

⁴⁸ T. Østeraas: Skytebanene i Rena leir. Bruk av dekk-klipp i stedet for sand i skytevollene. Fagrapport Forsvarsbygg utvikling.

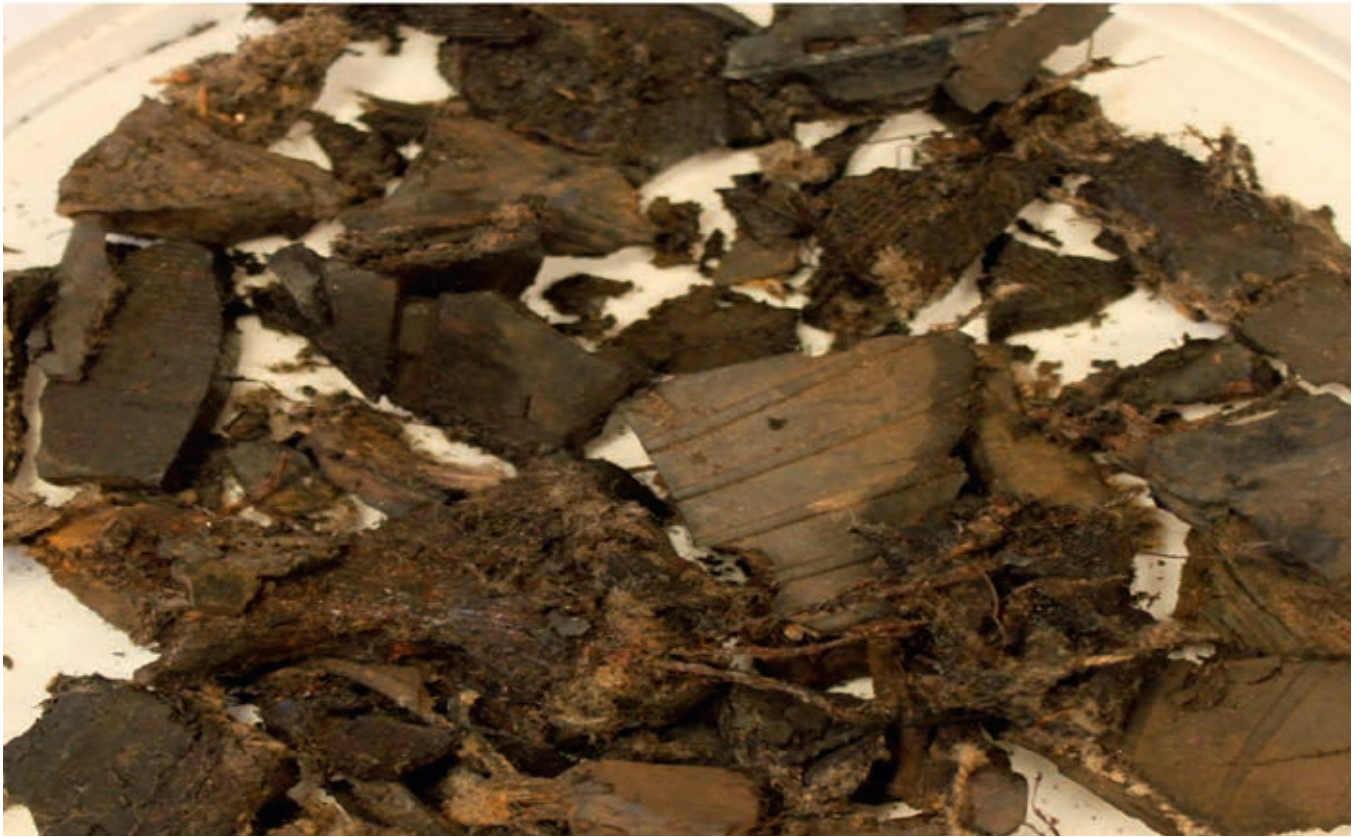


Fig. 66. Dekk-klipp som ikke er fragmentert av prosjektiler. Hver bit har en klart definert form uten utstikkende tekstilfragmenter.



Fig.67. Dekk-klipp fragmentert av prosjektiler. Bitene er mindre og har en utflytende form. Tekstilene er revet opp og danner dotter som har en positiv effekt på spredningen av gummistøv, men øker faren for brann.

i gummien. Prøver tatt i gummien på kortholdsbanen på Rødsætra viser at dette er tilfelle. Prosjektiler som kolliderer med gummibitene har ikke en tilsvarende avskalling av metallstøv.

Det er antatt at produksjonen av metallstøv er større ved skyting i kvartssand enn ved skyting i dekk-klipp. Kvartskornene er hardere enn kobber og mantelen blir derfor ripet opp ved kontakten med kornene. Forskjellen i produksjonen av metallstøv kan ha betydning for avrenningen av kobber fra skytevollen. En sammenligning av projektiler tatt fra skytevoll med kvarts og skytevoll med dekk-klipp viser at projektilene fra kvartssand har en mattere overflate enn projektiler fra dekk-klipp. Dette er en klar indikasjon på at kvartssanden gir en "sandblåseeffekt" som sannsynligvis gir høyere konsentrasjon av kobberstøv i anslagssonen.

For å verifisere antagelsen om større produksjon av kobberstøv i kvartssand enn i dekk-klipp ble to prøver fra bane 2 i Rena leir analysert. Like volumer av kvartssand og dekk-klipp fra anslagssonen i vollene ble kjørt gjennom en ristetest. Før risting ble alle synlige projektilrester fjernet. Prøvene ble oppsluttet før analyse. Analysene viser at kobberinnholdet i prøven fra kvartssand er dobbelt så høy som i prøven fra dekk-klipp.

Fragmentering av projektilene øker den eksponerte metalloverflaten og faren for utlekking av metaller. For å dokumentere forskjellene i lekkasjepotensialet ble det i forbindelse med forsøkene i Rena leir kjørt analyser på lekkasjevann fra hele projektiler og fragmenterte projektiler. Resultatet er vist i tabell 18. Verdiene i tabellen er fremkommet ved at hele projektiler og fragmenterte projektiler har ligget i vann i romtemperatur i én uke. Vannet er så analysert. I forsøket er det benyttet en blanding av blyholdig og ikke blyholdig ammunisjon. Tabellen viser at innholdet av kobber er ca 40 ganger høyere i vannet fra fragmenterte projektiler enn i vannet fra hele projektiler. Det er også markerte forskjeller i konsentrasjonen av sink og nikkel, mens innholdet av bly er forbausende lavt i begge prøvene. Dette skyldes sannsynligvis at blyet har fått et bekyttende oksidlag som hindrer utlekking.

Resultatene viser at en oppnår en klar reduksjon i avrenningsfaren ved å unngå fragmentering. Den miljømessige gevinsten ved å bruke dekk-klipp som vollmateriale kan derfor være stor.

Tabell 18. Utlaking av tungmetaller fra hele og fragmenterte projektiler. I testene som ligger til grunn for tabellen er det benyttet en blanding av blyholdig og blyfri ammunisjon. Alle verdier er i µg/l.

Parameter	Hele projektiler	Fragmenterte-projektiler
Arsen	<0,2	<0,2
Bly	<0,2	1,4
Kadmium	<0,01	<0,01
Kobber	3,8	160
Krom	0,69	<0,5
Nikkel	<0,5	8,2
Sink	<2,0	63

Dekk-klipp som er mettet med projektiler er klassifisert som farlig avfall og må behandles i henhold til kravene i deponiforskriften. Et alternativ til deponering er å separere gummi og projektiler slik at begge produktene kan resirkuleres. Forsøk med separering av kvartssand og projektiler har vist at prosessen er vanskelig og kostbar, først og fremst fordi andelen fragmenterte projektiler er stort og egenvektsforskjellen mellom sand og projektiler er forholdsvis liten. Dekk-klipp har en egenvekt på ca. 1, dvs. at den holder seg flytende i vann ved omrøring. Dette gjør det mulig å benytte en enkel flotasjonsteknikk for å skille gummi og projektiler. Et enkelt flotasjonsforsøk med 3 liter dekk-klipp mettet med projektiler ble gjennomført i Rena leir vinteren 2011. Blandingen av dekk-klipp og projektiler ble helt over i et kar med vann og ristet i 15 sekunder. Hele projektiler, projektilrester og løs cord fra dekk-klippet sank til bunns i karet, mens dekk-klippet kunne helles ut sammen med vannet. Fig 68 viser et bilde av projektiler og cord som ble liggende igjen på bunnen av karet. Andelen fragmenterte projektiler er stor på grunn av kollisjoner projektil mot projektil i anslagssonen.

Etter at forsøket var avsluttet ble restmengden av hele projektiler og fragmenter i gummien målt. < 10 % av det opprinnelige innholdet satt fast i gummien. Resten var bunnfelt. Dette viser at separering ved flotasjon i rent vann er mulig og at gummien kan brukes på nytt som vollmateriale når separasjonen er avsluttet.

Dekk-klipp inneholder et stort antall kjemiske forbindelser som er klassifisert som helsefarlige (PCBer, PAHer, ftalater, alkylfenoler og VOCer). Stoffene kan fremkalle astma, allergi eller i verste fall kreft. Den reelle



Fig. 68. Prosjektiler og prosjektilrester skilt ut fra mettet dekk-klipp ved flotasjon. Over 90 % av prosjektilene ble skilt ut fra gummien i prosessen. De mørke dottene som ligger spredt i bildet er sammenfiltret cord.



Fig. 69. Dekk-klippbit tatt fra kortholdsbanen på Rødsetra i Regionfelt Østlandet. Bildet viser hvordan prosjektilene kiles fast i gummien med minimal fragmentering. Gummibiter med fastkilte prosjektiler bunnfelles sammen med rene prosjektiler i flotasjonen.

helsefaren er vurdert i flere publikasjoner hvorav to er svært detaljerte og omfattende.⁴⁹ De to rapportene tar for seg eksponeringsfaren i idrettshaller hvor det er benyttet gummigranulat som underlag for kunstgress. Dette er lukkede haller hvor faren for eksponering er større enn fra skytevoller i friluft. I risikovurderingen er innånding av frigjorte gasser og svevestøv, hudkontakt og svelging vurdert i et worst case- scenario. Konklusjonen i rapporten fra Folkehelseinstituttet og Radiumhospitalet er at:

“- eksponeringen ved bruk av innendørshaller med kunstgress hvor det benyttes resirkulert gummigranulat, foreligger det ingen grunn til å anta at bruken av disse medfører en økt helserisiko. Det tas imidlertid et visst forbehold når det gjelder utvikling av astma/luftveisallergi hvor kunnskapen er begrenset.”

Konklusjonene i rapporten er sannsynligvis mest representativ for innendørs skytebaner hvor dekk-klipp eller gummigranulat benyttes i fangvollene. For skytevoller i friluft vil helserisikoen være enda mindre enn i lukkede haller. I denne sammenheng må derfor dekk-klipp vurderes som et produkt som ikke gir økt helserisiko og sannsynligvis klart mindre risiko enn ved bruk av kvarts-

sand som fangmateriale. For øvrig må det også presiseres at eksponeringsfaren er større ved bruk av granulat enn dekk-klipp på grunn av den store forskjellen i kornstørrelse.

Med utgangspunkt i den omfattende dokumentasjonen som ble fremskaffet gjennom forsøkene i RØ, Rena leir og ved FFI og Raufoss Nammo ble det besluttet å bygge to fullskala kortholdsbaner med dekk-klippvoller på Rødsætra i RØ. Senere ble det også besluttet å erstatte sandvollene på banene i Rena leir med dekk-klippvoller. Vollene i Rena leir er godkjent av Miljødirektoratet, mens vollene på Rødsætra fremdeles drives på forsøksbasis.

Banene på Rødsætra var opprinnelig planlagt som forsøksanlegg hvor både avrenningen av fenoler og tungmetaller skulle studeres nærmere med tanke på å utvikle effektive renseløsninger. Etableringen av forsøkene er blitt forsinket og vil ikke bli satt i gang før tidligst sommeren 2014. I de nye planene inngår både oksidasjonsdammer for fenoler og innblåsing av Blueguard 63 i dekk-klippet på den ene banen. Resultatene av forsøkene vil være avgjørende for om dekk-klipp vil bli godkjent for bruk på åpne voller av den typen en har i RØ.



Fig. 70. Vollen på én av kortholdsbanene på Rødsætra under bygging.

⁴⁹ Nasjonalt Folkehelseinstitutt og Radiumhospitalet, 2006: Kunstgressbaner – vurdering av helserisiko for fotballspillere NILU, 2006: Måling av luftforurensning i innendørs kunstgresshaller.



Fig. 71. Bane 4 i Rena leir. Dekk-klippet ligger under tak som beskytter mot nedbør og avrenning. Ulempen med løsningen er at dekk-klippet tørker ut slik at brannfaren øker.

Vollene i Rena leir ligger under tak og er derfor beskyttet mot nedbør. Dette medfører at dekk-klippet tørker ut og brannfaren øker i forhold til i frittliggende voll. Det er derfor nedlagt forbud mot skyting med sporlys på disse banene etter en storbrann og et par mindre tilløp til brann i vollene.

I forbindelse med rehabiliteringen av bane 2 B på Rødsmoen ble det utviklet en egen gabionløsning som alternativ til tradisjonell fangvoll. En gabion er en nettingkiste laget av dobbeltvistet firkantnett med ståltråd av høy kvalitet. Nettingkistene, som er 1 x 1 x 1 m leveres flatpakket og settes opp på stedet. Opprinnelig ble gabioner med stein som fyllmasse laget som et alternativ til forstøtningsmurer for ustabile masser. I gabionene som ble laget for bane 2 B ble det benyttet multiklipp som fyllmateriale i stedet for stein. For å holde multiklippet på plass ble det lagt en fiberduk som tetting inn mot nettingen.

Fordelene med gabionløsningen fremfor tradisjonell fangvoll er flere:

- Gabioner kan settes ut med gaffeltruck og stables til ønsket høyde og form.

- På grunn av vertikal anslagsflate er gabionene riko-sjettfrie.
- Gabioner som er mettet med prosjektiler kan løftes ut og erstattes med rene gabioner. Prosjektiler og multiklipp kan resirkuleres i en enkel flotasjonsprosess.
- Reaktivt materiale som binder tungmetaller kan legges i bunnen av hver gabion slik at avrenning av tungmetaller unngås.

En skisse av gabionløsningen som ble utviklet for bane 2 B er vist i fig. 72. Gabionene kan stables, men må bindes sammen i rekker ved stabling til større høyder.

For å teste holdbarheten av nettingen og fiberduken i gabionene ved direkte prosjektilanslag ble det foretatt prøveskyting på bane 2 i Rena leir. En sirkulær, oransje flate med diameter 10 cm på fronten av forsøksgabionen ble beskutt med 150 skudd med kaliber 5,56 fra 30 m standplass. Som fig. 73 viser ble enkelte tråder skutt over og fiberduken ble gjennomhullet. Skadene var imidlertid ikke så alvorlige at gummibiter skled ut av gabionen. Tvert i mot virket det som om gummien ble komprimert og fikk større fasthet i treffområdet enn i områdene rundt. Det var ingen antydning til rikosjetter under sky-

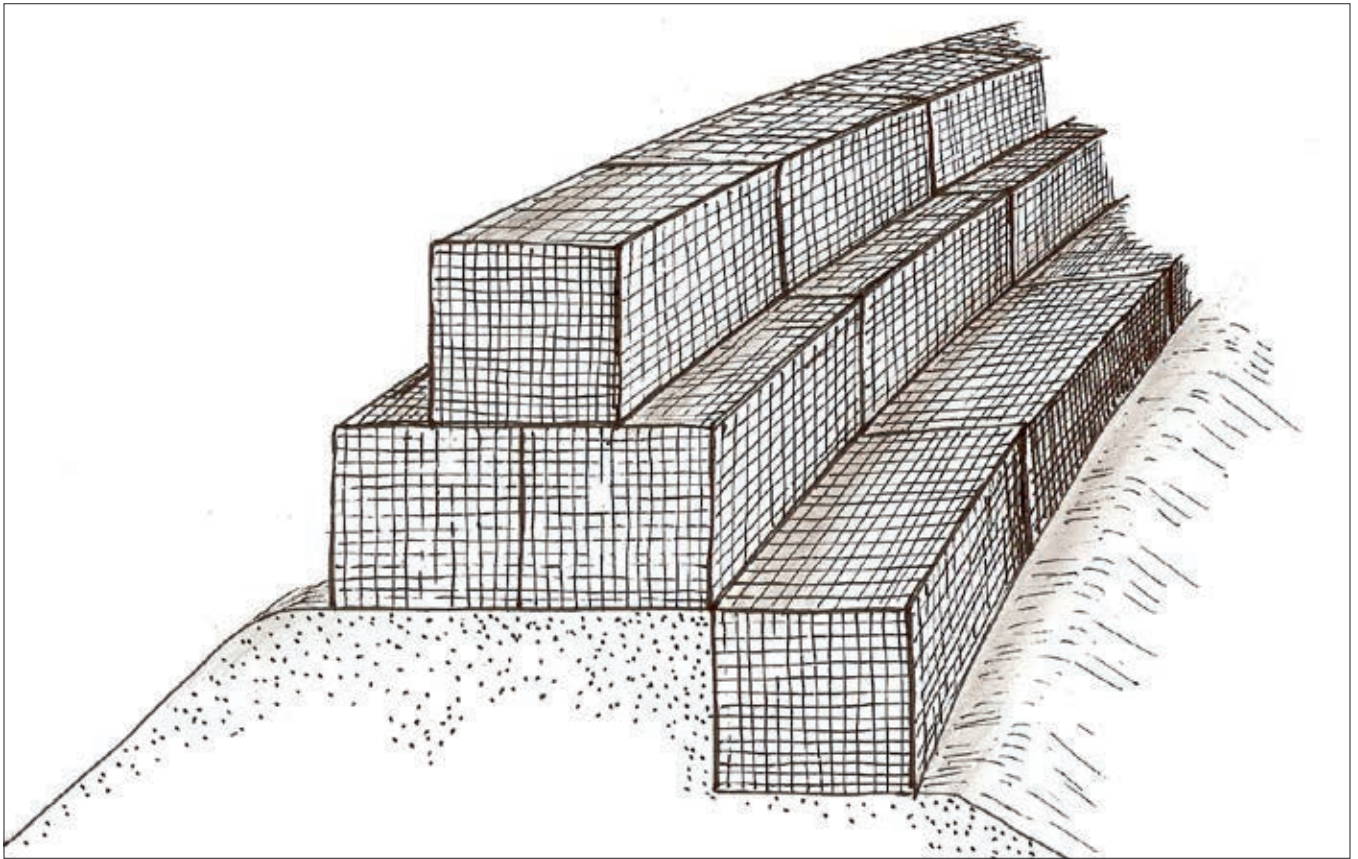


Fig. 72. Gabioner med multiklipp stablet som rikosjett- og forurensningsfri fangvoll. Forslaget ble laget for bane 2B på Rødsmoen, men ble aldri bygget.

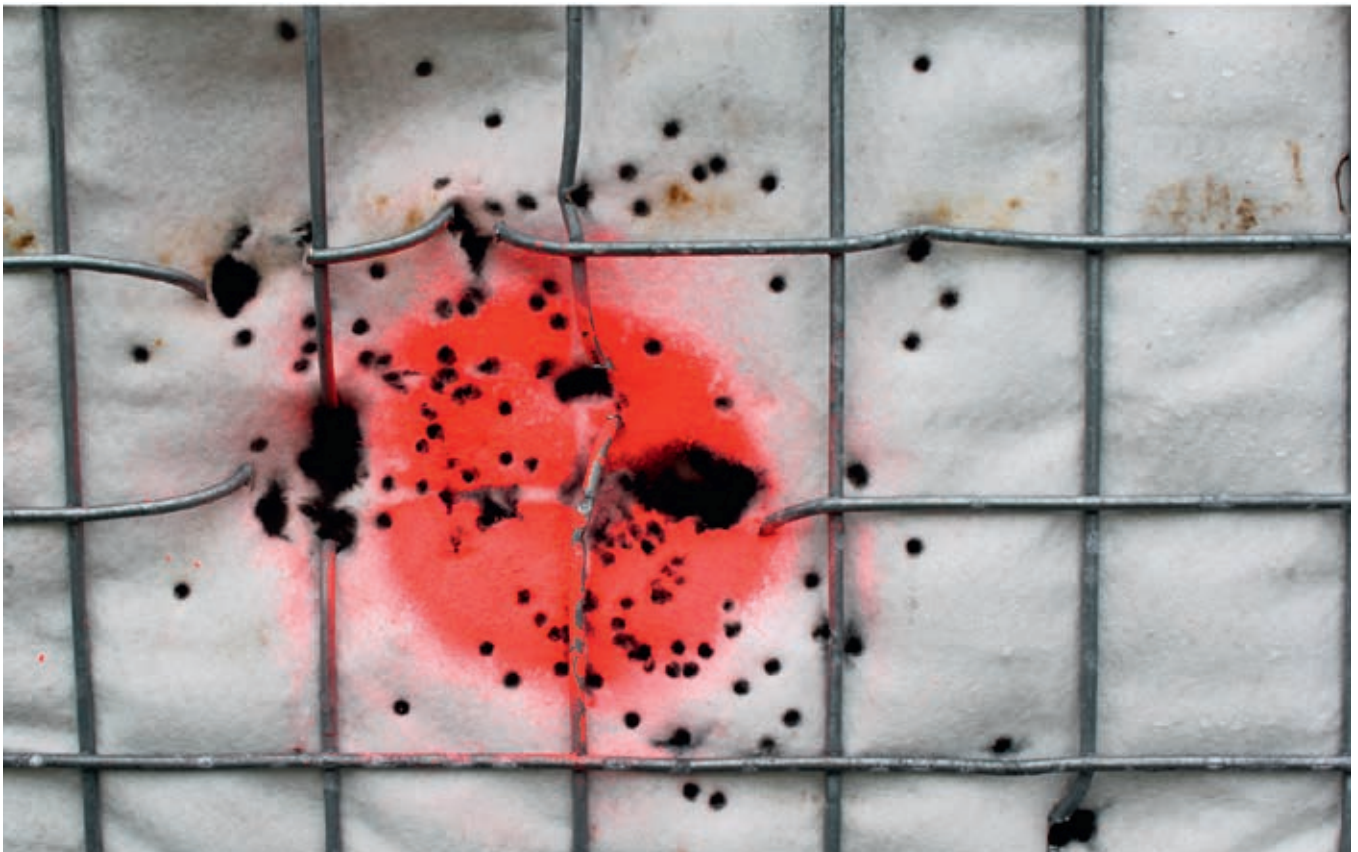


Fig. 73. Resultatet av prøveskyting med 150 skudd mot gabion fylt med mulitklipp. Skadene på stålnettet og fiberduken medførte ikke utrasing av dekk-klippbiter. Tvert i mot ble gummien komprimert og mer stabil mot utrasing.

tingen. Forsøkene konkluderte derfor med at gummi-fylte gabioner har tilfredsstillende holdbarhet i skytevol-ler hvor det kun benyttes håndvåpen og hvor treffene er spredt over en større flate. Gabionene ble ikke testet for grovere ammunisjon enn 5,56. Det anses imidlertid som lite sannsynlig at resultatet vil bli vesentlig annerledes om det benyttes kaliber 7,62.

Selv om forsøkene med gabioner var svært lovende valgte en å bruke den velprøvde løsningen med minerogen fangvoll ved rehabiliteringen av anlegget på B 2-banen. En viktig årsak var at anleggskostnadene, for gabionløsningen er vesentlig høyere enn for en tradisjonell fangvoll. Kostnadene med eventuell håndtering av tungmetallavrenningen fra den tradisjonelle vollen ble ikke trukket inn i regnskapet.

Et foreløpig uløst problem i forbindelse med bruk av dekk-klipp i skytevoller er avrenningen av fenoler. Fenolene finnes først og fremst i harpiksene som er en beskyttende bestanddel i gummien. Selv om lekkasjen av disse stoffene ligger på et svært lavt nivå kan de gi negative effekter på levende organismer i vann.

Det finnes ingen målinger på konsentrasjonen av fenolene i avrenningen fra skytevollene i RØ eller i Rena leir. Analyser fra dekk-klippfilteret i Tverrfjellet gruver på Hjerkinns viser imidlertid at akseptkriteriene⁵⁰ overskrides for avrenning fra multiklipp. Det er derimot ikke målt verdier over akseptkriteriene i avrenning fra enkelt-klipp.

Før dekk-klipp blir akseptert brukt i større omfang i skytevoller må fenolproblemet løses, enten ved å begrense utlekkingen eller ved oksidering av utløpsvannet. Innblåsing av karbonaktivert, olivingranulat i dekk-klippet kan være en løsning som reduserer både fenolavrenningen og avrenningen av tungmetaller. Metoden er foreløpig bare prøvd i laboratorieskala.

⁵⁰ Rambøll Norge AS, 2008: Gjenbruk av bildekk i geokonstruksjoner. Miljøovervåking 2001 - 2007

ANBEFALINGER

Tiltakene som er beskrevet i rapporten er i stor grad et resultat av et målrettet arbeid for å løse problemer som har oppstått underveis ved utbyggingen av RØ og tilbakeføringen av Hjerkinns skytefelt. De fleste løsningene er prøvd ut som fullskalaanlegg på konkrete problemstillinger. Anvisningene er derfor først og fremst basert på praktisk erfaring i felt og i mindre grad på laboratorietester og modellforsøk. Dette gir en sterk dokumentasjon på at løsningene fungerer under de forhold en har hatt der anleggene ligger. Det teoretiske underlaget for å forstå prosessene som har gitt de gode resultatene kan derimot være mangelfulle. For den videre bruk av løsningene under andre naturgitte og bruksmessige forhold vil det være av stor verdi at prosessene studeres nærmere. Dette kan gjøre det mulig å påvirke fremtidige løsninger på forurensningsproblemene på en positiv måte. Det kan også gi innspill til videreutvikling av både løsningene og de aktive sorbentene som er brukt i anleggene.

Et viktig utgangspunkt for alle løsninger som er presentert i rapporten er at forurensningsproblemene i størst mulig grad skal håndteres lokalt. Opplasting og bortkjøring av forurensede masser er eksempler på løsninger som er blitt nedprioritert i arbeidet, primært fordi disse

erfaringsmessig kan skape nye utfordringer i etterkant. In situ-løsninger med reaktiv capping og bruk av lokale, avrenningssikrede deponier har på den annen side fått stor plass i vårt arbeide.

Gjeldende regelverk kan i enkelte tilfeller være til hinder for at nye løsningene kan brukes fritt. Anleggene som er utviklet både i RØ og på Hjerkinns er imidlertid gode eksempler på at det er mulig å få aksept for nye tanker og tiltak, selv om de i utgangspunktet ikke er helt i samsvar med regelverket.

Det er å håpe at foreliggende rapport kan gi inspirasjon til å vurdere alternative løsninger for håndtering av Forsvarets forurensningsproblemer i tiden fremover. Ikke minst mener vi dette er viktig når tiltak både i aktive og nedlagte skytefelt skal utredes. Som det er presisert flere steder i rapporten kan imidlertid løsningene ikke brukes ukritisk. De lokale forhold må alltid legges til grunn når tiltaksløsning velges.

REFERANSER

- Adriano D. C. 1986:** Trace Elements in the terrestrial environment. Institute of Ecology University of Georgia. USA.
- Borvik T. 2012:** Kvartærgeologisk kart over sentrale Dovrefjell. Fagrapport UiB.
- Block C. et. al. 2013:** Waste water treatment Maatheide Lommel (Belgium). KU Leuven – Dept. Chemical Engineering.
- Fylkesmannen i Oppland 2007:** Hjerkinns skytefelt - Tillatelse etter forurensningsloven for tiltak i forbindelse med tilbakeføring av skytefelt til sivile formål.
- Haugsgjerd I. 2010:** Reinsing av Kopar i sur gruveavrenning (AMD) med algeaktivert granulert torv som sorbent. UMB, Institutt for plante- og miljøvitenskap.
- Håøya A. O. & Unsgård G. T. 2004:** Miljøovervåkning 2001 – 2003. Avrenning fra kvernet bildekk. Scandiaconsult AS.
- Håøya, A. O. & al. 2008:** Gjenbruk av bildekk i geokonstruksjoner. Rambøll oppdragsrapport.
- Iversen E.R. 2009:** Kontroll av avrenningen fra Tverrfjellet gruve. Konsulentrapport. NIVA.
- Jacks G., Maxe L. 1984:** Surt grundvatten – En kunnskapsöversikt. SNV report PM 1851
- Kleiv R. A. 2001:** Heavy metal adsorption on silicate tailings. Doctoral thesis NTNU Dept. of Geology and Mineral Engineering.
- Kleiv R. A. & Sandvik K. L. 2002:** Modelling copper adsorption on olivine process dust using simple linear multivariable regression model. Minerals Engineering 15, 2002.
- Miljøverndepartementet 2004:** Forskrift om gjenvinning og behandling av avfall.
- Moen K. 2005:** Quantification of quartz in olivine product. AFS50. NTNU Report.
- Nasjonalt Folkehelseinstitutt og Radiumhospitalet, 2006:** Kunstgressbaner – vurdering av helserisiko for fotballspillere.
- NILU, 2006:** Måling av luftforurensning i innendørs kunstgresshaller. Fagrapport
- Olafsen R. 1996:** Rensing av tungmetall- og oljeforurenset avløpsvann i bark/lettklinkerfilter. Hovedoppgave ved fakultetet for geofag og petroleumsteknologi, NTNU.
- Okkenhaug G. 2012:** Mobility and solubility of antimony (Sb) in the environment. Doctoral thesis UMB Dept. of plant and environmental sciences.
- Rambøll Norge AS, 2008:** Gjenbruk av bildekk i geokonstruksjoner. Miljøovervåkning 2001 – 2007. Fagrapport.
- Reinius E. 1964:** Vattenbyggnadsteknik. Svenska bokförlaget.
- Rognerud S. 2013:** Hjerkinns skytefelt 2001 - 2012. Overvåking av metallkonsentrasjoner i bekker, elver og grunnvannsbrønner. Fagrapport
- Segalstad T. V. 1997:** Nikkel i olivin. Rapport Mineralogisk – Geologisk museum UiO.
- Strømseng A. E., Ljønes M., Mariussen E. 2010:** Testing av jordforbedringsmidler for stabilisering av tungmetaller i jord. FFI-rapport 2010/00696.
- Westberg B. & Mácsik J. 2000:** Laboratorieprovning av gummiklipps. Miljötekniska egenskaper. Institutionen för Väg- och vattenbyggnad.
- Østeraas T. 2005:** Regionfelt Østlandet. Tungmetaller i grus- og pukkprodukter fra Deifjellet. Interconsult oppdragsrapport.
- Østeraas T. 1995:** Georessursplan for Forsvarets anlegg på Rena. Interconsult oppdragsrapport
- Østeraas T. 2005:** Tungmetaller i Deifjellet, Regionfelt Østlandet. Fagrapport, Forsvarsbygg utvikling.
- Østeraas T. 2010:** GjenVinn- prosjektet. Bruk av dekkklipp som rensemedium for tungmetaller. Fagrapport. Forsvarsbygg utvikling.

Østeraas T. 2010: Binding av tungmetaller i olivingranulat ved Raufoss Metall. Oppdragsrapport.

Østeraas T. 2010: Forsøk med Blueguard olivingranulat som rensemedium for tungmetallholdig avrenning fra Tverrfjellet gruver. Fagrapport Forsvarsbygg utvikling.



www.forsvarsbygg.no