

RAPPORT LNR 4209-2000

Overvåking av metallforurensning fra militære skytefelt og demoleringsplasser

Resultater fra ni års overvåking



Hovedkontor

Postboks 173, Kjelsås
0411 Oslo
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 22 18 52 00
Internet: www.niva.no

Sørlandsavdelingen

Televeien 3
4879 Grimstad
Telefon (47) 37 29 50 55
Telefax (47) 37 04 45 13

Østlandsavdelingen

Sandvikaveien 41
2312 Ottestad
Telefon (47) 62 57 64 00
Telefax (47) 62 57 66 53

Vestlandsavdelingen

Nordnesboder 5
5008 Bergen
Telefon (47) 55 30 22 50
Telefax (47) 55 30 22 51

Akvaplan-NIVA A/S

9015 Tromsø
Telefon (47) 77 68 52 80
Telefax (47) 77 68 05 09

| | | |
|--|---------------------------------------|----------------------|
| Tittel Overvåking av metallforurensning fra militære skytefelt og demoleringsplasser. | Løpenr. (for bestilling) 4209-2000 | Dato mars 2000 |
| | Prosjektnr. Undernr. 99140 | Sider Pris 41 |
| Resultater fra 9 års overvåking. | Fagområde miljøgifter | Distribusjon åpen |
| | Geografisk område Norge | Trykket NIVA |
| Forfatter(e) Sigurd Rognerud | | |

| | |
|--|--------------------------------------|
| Oppdragsgiver(e) Forsvarets bygningstjeneste, sentralledelsen og Nammo Raufoss AS | Oppdragsreferanse Ellen T. Halaas |
|--|--------------------------------------|

Sammendrag. Bruk av håndvåpen fører til at totalt flere hundre tonn metallholdige prosjektiler deponeres årlig i Forsvarets skytefelt. Disse inneholder i utgangspunktet 60% bly, 30% kobber, 7% antimon og 3% sink på vektbasis. Konsentrasjoner av disse elementene i bekker som avvanner skytefeltene var klart høyere enn generelt i norske innsjøer, og godt over tålegrensene for de fleste akvatiske organismer i de mest belastede feltene. Overvåkingen har i alle år fokusert på av forurensningsgraden av bly og kobber, og den baserer seg på anvendelse av vannmoser som biomonitor. Det var gode sammenhenger mellom konsentrasjonene av både bly og kobber i vann og mose, men opptakseffektiviteten var lavere når vannet innholdt mer humusstoffer. Mosene gir i hovedsak informasjon om den biotilgjengelige delen av totalkonsentrasjonen i vann som er viktig når toksiske effekter på akvatiske organismer skal vurderes. Faren for kontaminering av prøvene ved bruk av biomonitorer er liten. Dette gjør at Forsvarets egne folk har kunnet delta i prøveinnsamlingen og derved gitt betydelige reduksjoner i kostnadene. Forurensningsgraden var svært forskjellig i de ulike feltene. Det er flere årsaker til dette, men de viktigste er brukerfrekvensen av banene, fysiske inngrep i deponiene som graving og sporsetting og de naturgitte forhold. Vannkvaliteten i alle bekkene som avvanner feltskytebanene på Steinsjøen må karakteriseres som meget dårlig. I 1999 var konsentrasjonene de høyeste som har vært registrert og vannkvaliteten bør overvåkes nøye i tiden fremover spesielt for å evaluere effektene av kalkningstiltakene. Vannkvaliteten i Evjemoen skytefelt må karakteriseres som dårlig til meget dårlig selv om konsentrasjonene har sunket noe de senere årene etter at gravearbeidene er avsluttet. Det var en klart forhøyet konsentrasjon av nikkell i vannet som avvanner kulefangervollene. Vi vil foreslå at feltskytebanen kalkes ytterligere og at nikkelslaget på kulefangervollene byttes ut med masser som ikke forurenser. Det var ikke store forurensningsproblemer i bekkene som avvanner skytefeltene på Terningmoen, Mauken, Porsangmoen, Rena, Ringerike, demoleringsfeltet i Lærdal og testsenteret på Raufoss. I Sætermoen skytefelt har ingen av de antatte forurensningskildene (den nye skytebanen, skrothaugen eller hele skytefeltet) hatt nevneverdig innflytelse på konsentrasjonene av bly og kobber i avrenningen, med unntak av feltskytebanen på Karlstadskogen der høye blyverdier ble registrert. Det var generelt en god sammenheng mellom konsentrasjonene av bly og kobber i bekkene som avvanner skytefeltene på Mjølfjell, Høybuktoens østre del, Hengsvatn og Heistadmoen. Alle disse feltene ble inkludert i overvåkingen for første gang i 1999. Generelt var konsentrasjonene av bly og kobber i Høybuktoens østre felt, Hengsvatn og Heistadmoen høyere enn de en finner i norske innsjøer. Vannkvaliteten kan karakteriseres som god i Mjølfjell skytefelt og mindre god til nokså dårlig i de andre feltene.

| | |
|---|---|
| <p>Fire norske emneord</p> <ol style="list-style-type: none"> Militære skytefelt og demoleringsfelt Overvåking av vannkvalitet Vannforurensning Kobber og bly | <p>Fire engelske emneord</p> <ol style="list-style-type: none"> Military firing ranges and demolition sites Monitoring of water quality Water pollution Copper and lead |
|---|---|

Sigurd Rognerud
Prosjektleder

Forskningsleder

Ulf Rønne Selth
Forskningsjef

O-99140

Overvåkning av metallforurensning fra militære skytefelt og
demoleringsplasser.

Resultater fra ni års overvåkning

Saksbehandler: Sigurd Rognerud

Medarbeidere: Gösta Kjellberg (NIVA)
Mette-Gun Nordheim (NIVA)
Jarl Eivind Løvik (NIVA)
Kjell Langvassli (Forsvaret, Mauken)
Torkild Westgaard (Forsvaret, Sætermoen)
Curt Dahle (Forsvaret, Porsangmoen)
Asle Figenskau (Forsvaret, Lærdal)
Even Sandland (Forsvaret, Evjemoen)
Jim Åge Isaksen (Forsvaret, Høybuktkmoen)
Geir Nordskog (Forsvaret, Heistadmoen)
Arne Haugland (Forsvaret, Mjølfjell)

Innholdsfortegnelse

| | |
|---|----|
| Forord..... | 4 |
| Sammendrag..... | 5 |
| Innledning..... | 8 |
| Metoder..... | 10 |
| Valg av metode..... | 10 |
| Innsamlingsrutiner for mosene og metodetest..... | 11 |
| Sammenhengen mellom metallkonsentrasjoner i vann og mose..... | 11 |
| Generell vannkvalitet og metaller som finnes i forhøyede konsentrasjoner i bekker som avvanner skytefelt..... | 13 |
| Kjemiske analysemetoder..... | 16 |
| Klassifisering av tilstand | 16 |
| Resultater..... | 17 |
| Bradalsmyra..... | 17 |
| Evjemoen..... | 19 |
| Steinsjøfeltet..... | 21 |
| Terningmoen..... | 23 |
| Mauken..... | 25 |
| Porsangmoen..... | 27 |
| Lærdalfeltet..... | 29 |
| Sætermoen..... | 31 |
| Ringerike og Rena skyte- og øvningsfelt..... | 33 |
| Heistadmoen, Hengsvatn, Mjølfjell og Høybuktnoen..... | 34 |
| Sammenfattende diskusjon..... | 37 |
| Litteraturliste..... | 39 |
| Vedlegg | |

Forord

Denne rapporten er den åttende årsrapporten fra en overvåkning av metallavrenningen fra 6 av Forsvarets etablerte skytefelt, og ett demoleringsfelt (1993-99) samt Bradalsmyra forsøksfelt tilhørende Nammo Raufoss AS. I tillegg har Sætermoen skytefelt blitt undersøkt i siden 1996, Ringerike skyte-og øvningsfelt og Rena skytefelt siden 1998. De øvrige feltene ble startet opp i 1999. Prosjektet ble kontraktsfestet med Forsvaret 5. oktober 1998, og Forsvarets Bygningstjeneste, Sentralledelsen har stått som oppdragsgiver. Kontaktpersoner har vært overingeniør Ellen Halaas. Ragnar Haugen har vært kontaktperson ved Nammo Raufoss AS.

Feltarbeidet ble gjennomført sommer og høst 1999 med hjelp av skytefeltsadministrasjonene og miljøvernoffiserene der disse var tilstede. Vi vil spesielt takke Curt Dahle (Porsangmoen), Kjell Langvassli (Mauken), Even Sandland (Evjemoen), Torkild Westgaard (Sætermoen), Asle Figenskau (Lærdal), Jim Åge Isaksen (Høybukta), Geir Nordskog (Heistadmoen), og Arne Haugland (Mjølfjell) for aktiv deltagelse ved prøveinnsamling slik at undersøkelsene gikk etter programmet.

Moseprøvene og vannprøvene ble analysert ved NIVA's laboratorium i Oslo. Rapporten er utarbeidet ved NIVA's Østlandsavdeling.

Ottestad 21 mars 2000

Sammendrag

Bruk av håndvåpen deponerer årlig flere hundre tonn metallholdige prosjektiler i skytefeltene. Disse inneholder i utgangspunktet 60% bly, 30% kobber, 7% antimon og 3% sink på vektbasis. I 1999 undersøke vi konsentrasjonene av 50 elementer i 64 vannprøver fra skytefeltene. Disse resultatene har vi sammenliknet med resultater fra en nasjonal undersøkelse over konsentrasjoner av metaller i nær 1000 norske innsjøer der atmosfæriske avsetninger er eneste forurensningskilde (Skjelkvåle et al. 1996, Skjelkvåle et al. 1999). Av de elementene som ble analysert i begge undersøkelsene var det bly, kobber, antimon, sink og barium som forekom i klart høyere konsentrasjoner i vann fra skytefeltene enn i innsjøene (3 til 10 ganger). Basert på maksimumverdiene var de absolutte forskjellene mellom konsentrasjoner i vann fra de mest belastede skytefeltene og naturlig vann størst for kobber og bly. Konsentrasjonene av bly, kobber og sink var ca. 200 µg/l i vann fra de mest forurensede feltskytebanene. Dette er godt over tålegrensene for de fleste akvatiske organismer.

Vannkvaliteten betyr mye for metallenes tilstandsform, korrosjonshastighet av metallholdige fragmenter og transport ut fra deponeringstedet. Generelt kan vi si at bly, kobber, antimon og sink forekommer som kationer og løses i større grad i surt vann enn i nær nøytralt vann. Løste humussyrer (måles ved vannfargen) produseres ved nedbrytning av humustoffer i feltene. De er sterke metallbindere og derved de viktigste transportørene av metaller ut fra feltene. Det var relativt små forskjeller i vannkvalitet innen hvert felt og vannet kan generelt karakteriseres som klart og svakt surt i Mjølfjell-feltet og Lærdals-feltet, klart og svakt basisk i Mauken, Sætermoen og Porsangmoen skytefelter, moderat brunfarget og nær nøytralt i feltene på Bradalsmyra, Hengsvatn, Heistadmoen, Rena, Høybukta, Terningmoen og Ringerike, mens det var brunt og surt på Steinsjøen og Evjemoen. Det var imidlertid noen få unntak slik som stasjon 2 i Steinsjøfeltet, stasjon 8 på Bradalsmyra og feltskytebanen på Karlstadskogen (Sætermoen), som alle hadde betydelig surere og brunere vann enn de andre stasjonene på feltet, mens vestre felt på Høybukta hadde klarere vann enn det østre.

Overvåkingen har i alle år fokusert på av forurensningsgraden med hensyn til bly og kobber i bekker som drenerer skyte- og øvningsfeltene, fordi disse metallene har størst andel i prosjektilene og samtidig er giftig i lave konsentrasjoner. Metoden som er brukt baserer seg på anvendelse av vannmoser (*Fontinalis antipyretica*, *Fontinalis dalecarlica*) som biomonitor. Det var gode sammenhenger mellom konsentrasjonene av både bly og kobber i vann og mose, men opptakseffektiviteten var lavere når vannet innholdt mer humusstoffer. Dette skyldes at mosene ikke tar opp metaller som er kompleksbundet til humuspartikler. Således gir mosene oss informasjon om den biotilgjengelige delen av totalkonsentrasjonen i vann. Dette er viktig når toksiske effekter på akvatiske organismer diskuteres. Overvåkingen har også vist at i felter med humusfattig vann og nær nøytral pH-verdi var opptaket av metaller i mosene så effektiv at svært små endringer i vannkonsentrasjonene ga klare konsentrasjonsøkninger i mosene. Dette viser at bruken av biomonitorer er svært godt egnet i overvåkningsprogrammer der en ønsker å avdekke en eventuell negativ tidsutvikling i vannkvaliteten så tidlig som mulig.

Kontamineringsfaren ved bruk av biomonitorer er liten. Dette gjør at Forsvarets egne folk har kunnet delta i prøveinnsamlingen. Opplegget med slike lokale prøvetakere har fungert svært tilfredsstillende. På denne måten har det også vært mulig å gjennomføre et relativt omfattende, kostnadseffektivt og langsiktig overvåkningsprogram som har gitt nyttig informasjon om utvikling i tid og regionale forskjeller i vannkvaliteten i bekker fra ulike skytefelt.

Forurensningsgraden var svært forskjellig i de ulike feltene. Det er flere årsaker til dette, men de viktigste er brukerfrekvensen av banene, fysiske inngrep i deponiene som graving og sporsetting og de naturgitte forhold. Vannkvaliteten i alle bekkene som avvanner feltskytebanene på Steinsjøen må karakteriseres som dårlig eller meget dårlig. I 1999 var konsentrasjonene de høyeste som var registrert i hele overvåkningsperioden. Den nedbørrike sommeren kan imidlertid ha medvirket til dette. Vannkvaliteten bør overvåkes nøye i tiden fremover blant annet for å dokumentere eventuelle fremtidige effekter av kalkning av nærstridsområdet på feltskytebanen i Larsmyrdalen som ble utført våren 1999.

Vannkvaliteten i Evjemoen skytefelt må karakteriseres som meget dårlig selv om konsentrasjonene har sunket noe de senere årene etter at gravearbeidene er avsluttet. Det var en klart forhøyet konsentrasjon av nikkel i vannet som avvanner kulefangervollene. Vi vil foreslå at feltskytebanen kalkes ytterligere og at nikkelslagget på kulefangervollene byttes ut med masser som ikke forurensrer.

Det var ikke store forurensningsproblemer i bekkene som avvanner skytefeltene på Terningmoen, Mauken, Porsangmoen og demoleringsfeltet i Lærdal. Generelt sett har det ikke vært noen klar negativ utvikling i disse feltene, og tilstanden virker stabil. Likevel har det i enkelte tilfeller skjedd episoder der enkelte aktiviteter som har økt utløsningen av metaller, men årsakene har oftest vært klarlagt og tiltak har blitt gjort der dette var mulig. Således har overvåkingen oppfylt sin hovedhensikt, dvs å følge tidstrenden i metallkonsentrasjonene og gjøre tiltak raskt der dette har vært nødvendig.

For Kobbryggelva, Liveltskardelva og Langsvingsbekken i Sætermoen skytefelt har ingen av de antatte forurensningskildene (den nye skytebanen, skrothaugen eller hele skytefeltet) hatt nevneverdig innflytelse på konsentrasjonene av bly og kobber ved de stasjonene som har blitt undersøkt. I 1999 ble også forurensningen i bekken som avvanner feltskytebanen på Karlstadskogen undersøkt. Det ble registrert en betydelig konsentrasjonsøkning for bly, men noe mer moderat for kobber. På bakgrunn av konsentrasjonene i mosene kan vannkonsentrasjonene av bly og kobber i bekken etter feltskytebanen anslås å ha vært var henholdsvis ca. 10 µg/l og ca. 3 µg/l i gjennomsnitt for sommer/høst perioden. På bakgrunn av disse stikkprøvene vil vi foreslå at feltskytebanen på Karlstadskogen inkluderes i overvåkingen.

I alle årene som overvåkingen har pågått, har vi registrert en utlekking av bly og kobber fra demoleringsfeltet i Lærdal. Økningene i konsentrasjonene har imidlertid vært svært beskjedne og fortynningseffekten av den første sideelven gjør at konsentrasjonene var nær bakgrunnsnivået 1.5 km nedstrøms demoleringsfeltet. Virksomheten har ikke ført til økte konsentrasjoner av bly og kobber i Lærdalselva.

Testsenteret på Bradalsmyra har i overvåkningsperioden ikke forurenset Veltmannåa nevneverdig med bly og kobber. De mindre bekkene som avvanner bygningsmassen og utviklingsanlegget, har imidlertid tidvis hatt høye konsentrasjoner på grunn av enkeltutslipp. Disse bekkene renner imidlertid ikke til Veltmannåa og utslippene har opphørt.

Skyte- og øvningsfeltene på Ringerike og Rena er relativt nyetablerte og undersøkelsen tar sikte på å overvåke at de nye anleggene ikke produserer forurensninger av betydning i avrenningen fra feltene. De siste to årene har bly og kobber konsentrasjonene vært lave i begge felt, med unntak av to tilfeller i Ringerike hvor kobberkonsentrasjonene var nær 2,5 µg/l i 1999. Dette kan imidlertid ha sammenheng med meget lav vannføring om ettersommeren dette året.

Det var generelt en god sammenheng mellom konsentrasjonene av bly og kobber i bekkene som avvanner skytefeltene på Mjølfjell, Høybuktoens østre del, Hengsvatn og Heistadmoen som alle ble inkludert i overvåkingen for første gang i 1999. Bekken som avvanner Høybuktoens vestre felt hadde lave blyverdier, men forhøyede kobberverdier antagelig mest på grunn av luftutslipp fra russiske smelteverk. Generelt var konsentrasjonene av bly og kobber i Høybuktoens østre felt, Hengsvatn og Heistadmoen høyere enn de en finner i Norske innsjøer. Vannkvaliteten kan karakteriseres som god i Mjølfjell skytefelt og mindre god til nokså dårlig i de andre feltene.

Undersøkelsen har gitt oss viktige erfaringer med hensyn til hvordan en slik overvåking kan gjøres kostnadseffektiv, informativ og brukervennlig samtidig som den er vitenskapelig forsvarlig. Vi har utviklet et overvåkningsprogram der analyser av bly- og kobber-konsentrasjoner i vannmoser har vist seg å være en svært god metode for å vurdere betydningen av slike forurensninger fra skytefelt over lengre tidsperioder. Det har vært mulig, år etter år, å følge små forskjeller i konsentrasjoner mellom bekker innen et felt der forurensningsbildet ikke har endret seg selv om nedbørsmengdene har variert.

De enkleste og mest effektive tiltakene som kan gjøres i deponier i de mest utsatte skytefeltene er kalking, hindre graving, sporsetting og andre aktiviteter som mobiliserer bly-humusforbindelsene. Når blyholdige prosjektiler korroderer, dannes det en såkalt "crust" eller skorpe av blysalter på overflaten. Dannelsen av denne skorpen i et god bufret jordsmonn (nøytral til basisk pH) gjør at korrosjonshastigheten av prosjektilene reduseres betraktelig. Dette er en av årsakene til at

blyutlekkingen i enkelte skytefeltet med et godt bufret jordsmonn er relativt beskjeden. Dette er i hovedsak situasjonen i de nordnorske feltene Sætermoen, Mauken og Porsangmoen. Dersom jordsmonnet har lite kalsium og inneholder lite eller ubetydelige mengder bikarbonat (HCO_3^-), vil blysalter dannes i ubetydelige mengder eller eventuelt løses i perioder når vannet er tilstrekkelig surt. Da vil de frie blyionene i liten utstrekning danne salter, men i hovedsak bindes til humus, jernoksider eller leireminerale. Humus brytes ned til humussyrer og humuskolloider som kan ta opp løst bly, og transporterer dette ut fra deponiet med markvannet. Vi sier at blyet mobiliseres, og denne prosessen er med på ytterligere å øke korrosjonen av blyprosjektilet. Det er derfor at deponiene i sure, humusrike områder (f.eks. myrer) gir de største utlekkene. Dersom disse stedene i tillegg utsettes for graving eller sporsetting, vil gjennomtransporten av vann øke betydelig og samtidig sannsynligheten for erosjon av blyholdige organiske partikler. Dette er i hovedsak situasjonen i Steinsjøfeltet og i Evjemoen skytefelt.

Innledning

Denne rapporten er den sjuende årsrapporten fra overvåkningen av metaller i avrenningen fra Forsvarets skytefelt. Målsetningen med overvåkningen er å følge tidsutviklingen i konsentrasjonene av bly og kobber fra korroderte prosjektiler i avrenningsvannet fra de viktigste etablerte skytefeltene, samt å følge utviklingen fra starten i de nyetablerte feltene på Ringerike og Rena. Resultatene skal danne grunnlag for beslutninger om hvor det er nødvendig å gjøre tiltak for å begrense forurensningen og den videre overvåkningen skal klarlegge virkningen av disse tiltakene. Erfaringene fra overvåkningen vil også gi viktig informasjon om hvor og hvordan skytebaner og kulefangervoller bør anlegges i framtiden.

Det er spesielt bruken av handvåpen som skaper de største deponiene av metaller. Dette er en aktivitet som har foregått i mange år og i flere deler av landet. I begynnelsen av 1990-årene var de årlige deponeringer ca. 85 tonn bly, 41 tonn kobber, 5 tonn sink og 11 tonn antimon vesentlig i kulefangervoller og feltskytebaner (Rognerud et al. 1992), men i følge opplysninger fram HFK AMMK steg disse til det dobbelte i løpet av 1997. I tillegg til dette kommer Det frivillige skyttervesenets aktivitet som deponerer metaller i samme omfang som Forsvaret (Rognerud 1996). Det finnes ikke beregninger på de totale mengder som gjennom årenes løp er deponert i feltene, men i de mest brukte feltene deponeres det flere tonn tungmetaller årlig. Det er således betydelig potensielle mengder med forurensninger som finnes i feltene og de forsetter å øke årlig så lenge feltene er i bruk.

Spørsmålet om i hvilken grad disse deponiene forurenser vannet utenfor skytefeltene er blitt aktualisert i den senere tiden. Innen miljøforvaltningen og ulike interessegrupper vises det økende interesse for dette temaet. Forsvaret har et spesielt ansvar for forvaltningen av disse deponiene og skal i følge Stortingsmelding 46 (1988-89) som hovedregel også stå for gjennomføringen av egne miljøtiltak. Et hovedpoeng i denne sammenheng er at naturens tålegrenser ikke skal overstiges og at det praktiseres et "føre var"-prinsipp slik at miljøvernarbeidet blir forebyggende.

I løpet av de siste 10 årene har NIVA undersøkt avrenningen av tungmetaller fra ulike skytefelt (Kjellberg 1988, Kjellberg & Boye 1992, Rognerud & Boye 1992, Rognerud et al. 1993, Rognerud 1995, 1996, 1997, 1998, 1999). Testsenteret til Nammo Raufoss AS og demoleringsfeltet i Lærdal er også undersøkt (Rognerud 1994a, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999). I den pågående overvåkningsundersøkelsen har noen felter vært undersøkt alle årene. Dette gjelder Evjemoen, Steinsjøfeltet, Terningmoen, Mauken og Porsangmoen. De resterende feltene har blitt undersøkt i kortere perioder henholdsvis: Lærdal (1993-1999), Sætermoen (1996-1999), Ringerike (1998-1999), Rena (1998-1999), mens Heistadmoen, Hengsvatn, Høybuktmoen og Mjølfjell ble startet opp i 1999. Vannkvaliteten på Renafeltet ble også undersøkt i 1993 i forbindelse med en konsekvensutredning (Rognerud 1994b). Lokalisering av de undersøkte feltene er vist i Fig.1.

Deponiene i skytefeltene består i hovedsak av kobbermantlete blyprosjektiler. Disse inneholder i utgangspunktet 60 % bly, 30 % kobber, 7 % antimon og 3 % sink på vektbasis. I overvåkningen fram til 1998 har vi valgt å konsentrere undersøkelsen om bly og kobber da hovedbestanddelen av prosjektilene består av disse elementene. I 1999 undersøkelsen ble konsentrasjonene av et stort antall andre metaller (ca 70) undersøkt i vannprøver fra skytefeltene og sammenliknet konsentrasjoner observert i norske innsjøer. Foruten bly og kobber var det antimon, sink og barium som forekom i forhøyede konsentrasjoner i forhold til norske innsjøer. Vi presenterer en sammenfatning av dette i rapporten. Det har også vært hevdet at militære skytefelt kan være forurenset av kadmium. Denne undersøkelsen sammen med en tilsvarende utført i 1995 (Rognerud 1996) viser at dette ikke er tilfelle. Det er forurensninger av kobber og bly som kan skape de største problemene i avrenning fra kuledemonier. Spesielt bly kan føre til skader i økosystemet selv ved lave konsentrasjoner. Det er også knyttet store problemer til dette elementet dersom det forekommer i forhøyede konsentrasjoner i drikkevann.

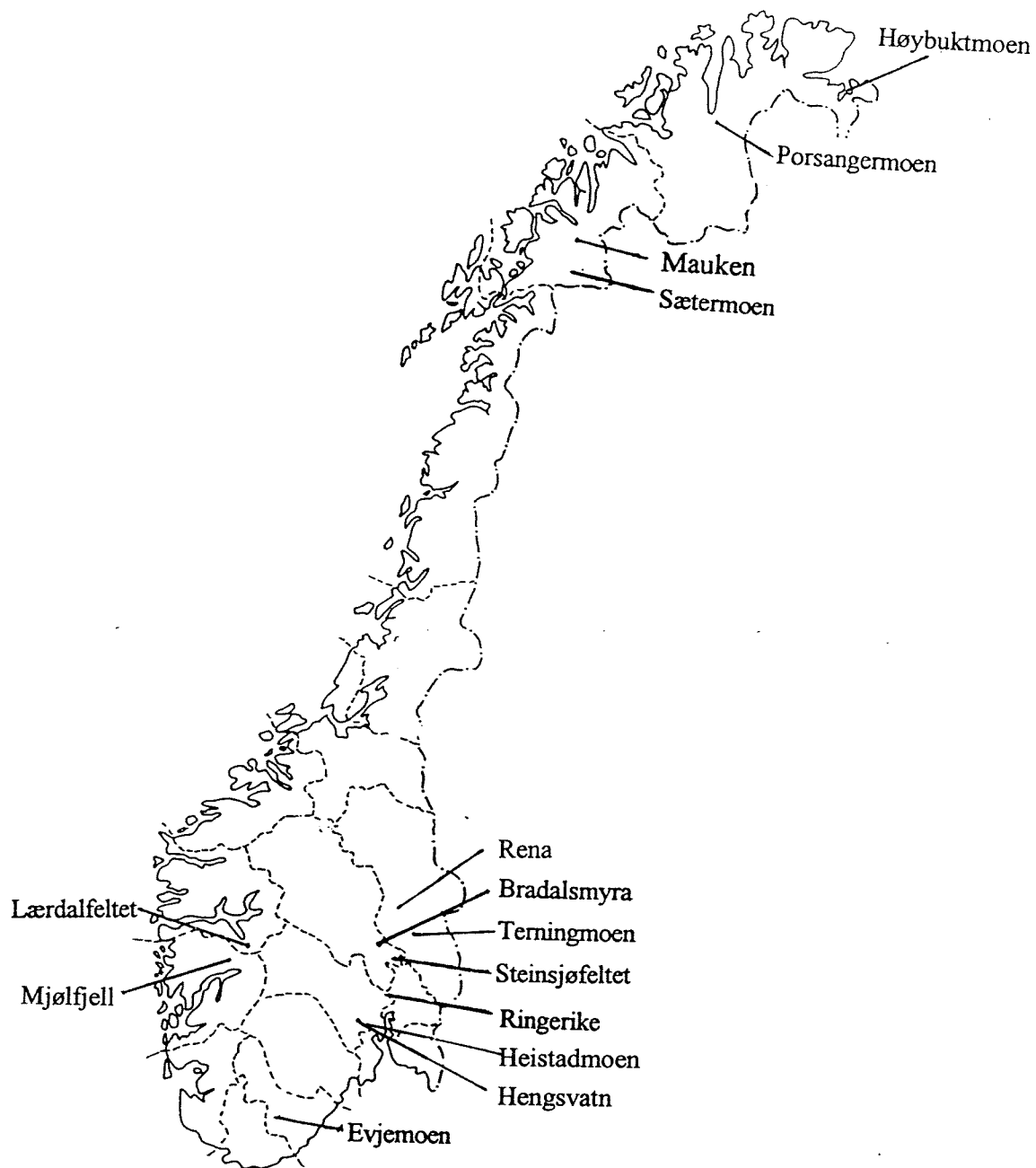


Fig.1. Lokalisering av de undersøkte militære skytefeltene og demoleringsfeltet ved Lærdal, samt Bradalsmyra test og utviklingsanlegg på Raufoss.

Metoder

Valg av metode

I lite eller moderat forurensede elver og bekker forekommer tungmetallene oftest i meget lave konsentrasjoner, og det kreves et stort antall vannprøver for å oppnå representative middelverdier over en lengre tidsperiode. I tillegg til dette kreves det omhyggelig rengjøring av prøveflasker og spesielle forhåndsregler ved prøvetakingen da kontamineringsfaren er meget stor ved slike prøveinnsamlinger. Konsentrasjonene i vann kan variere betydelig over kortere tid, og for enkelte tungmetaller er de også nær grensen for sikre målinger selv med ICP-MS teknikk. I forurensede bekker og elver er imidlertid konsentrasjonene oftest godt over grensen for sikre analyser. Et hovedproblem knyttet til beskrivelser av forurensningsgrad er at variasjonene i konsentrasjonene kan være betydelige både på grunn av naturlige variasjoner i vannføring og dreneringsmønster (viktig når kilden er et deponi), men også at utslippet av forurensningene kan variere betydelig over tid. Dersom en ønsker en representativ beskrivelse av forurensningsgraden basert på vannprøver, må et tett og ofte kostbart prøvetakningsprogram gjennomføres.

Et godt alternativ er ofte bruk av bioindikatorer som akkumulerer forurensningene i forhold til konsentrasjonsnivået i det omgivende vann (se litteraturgjennomgang av Johansson 1995). I bekker og elver er vannmoser av slekten *Fontinalis* vanlig å bruke vesentlig på grunn av følgende forhold:

- Denne moseslekten finnes nær sagt overalt på den nordlige halvkule. Opptakseffektiviteten kan variere noe for ulike moseslekter, men ved bare å benytte arter fra slekten *Fontinalis* kan resultater sammenliknes fra ulike geografiske områder (Lopez et al. 1994).
- Mosene tar effektivt opp metaller som forekommer som kationer i vannet, og de er svært tolerante overfor høge metallkonsentrasjoner og stress i omgivelsene som for eksempel perioder med uttørking (Say og Whitton 1983, Lopez og Carballeira 1990)
- Mosene har ikke røtter og påvirkes kun av konsentrasjoner av forurensningene i vannfasen. Opptakseffektiviteten er avhengig av vannkvaliteten (spesielt pH og løst organisk materiale) ved at den har betydning for metallens tilstandsform. Mosene tar i hovedsak opp fri metallioner og reflekterer derfor i hovedtrekk den biotilgjengelige fraksjonen (Bengtsson og Lithner 1981).
- Mosene har en rask opptakshastighet, men en mye seinere utskilleleshastighet (Lopez et al. 1994). Betydningen av et utslipp for akvatiske organismer er oftest relatert til varigheten. Tidsaspektet ved utslippet vil delvis gjenspeiles i mosene ved at utskilleleshastigheten er senere (dvs. nedgangen i konsentrasjonen i mosen går tregere) når eksponeringsperioden har vært lang (Kelly et al. 1987). Dette gjør at de gjenspeiler den midlere vannkonsentrasjonen over 2-3 uker på en god måte også i de tilfeller hvor en har hatt pulser med høge konsentrasjoner som f.eks. ved tilfeldige utslipp (Mouvet et al. 1993, Lopez et al. 1994). Dette er en meget viktig egenskap ved vurdering av forurensningsgrad i akvatiske systemer med punktkilder.
- Mosene er betydelig anrikt på metaller i forhold til vann (oftest 10 000-20 000 ganger) og kontamineringsrisikoen er derfor liten ved behandling av slike prøver (Johansson 1995).

Disse egenskapene gjør at vannmoser også er mye brukt av geologer på leting etter tungmetallholdige mineraler. Det er spesielt i Canada, men også i Skandinavia og Russland at moser er brukt i denne sammenheng. Den meget sterke oppkonsentrasjonen som finner sted i vannmosene, gjør at de ofte er et mye bedre medium til å fange opp geokjemiske anomaliteter enn mange andre metoder slik som f.eks. analyser av bekkesedimenter og vann (Smith 1986). Det er imidlertid ikke bare ved leting etter mineralforekomster at vannmoser har vist sin fortreffelighet. I mange land brukes de også ved overvåkning av metallkonsentrasjoner i bekker og elver som avvanner gruver og urbane områder. I denne sammenheng kan vi nevne at teknikken er benyttet i Sverige (Selinus 1988, Lithner 1989, Johansson 1995), Canada (Barryman 1990), Frankrike (Mouvet et al. 1993), Belgia (Descay & Empain 1981), England (Kelly et al. 1987), Tyskland (Frost 1990), Sveits (Klein et al 1991) og i Portugal (Monteiro et al 1989). Foruten den overvåkingen som rapporteres her, er vannmoser også benyttet i Norge ved undersøkelser av forurensninger fra gruveavganger, slagghauger og deponier (Lingsten 1991, Kjellberg 1994) samt ved utslipp fra virksomhet knyttet til impregnering av trevirke (Rasmussen og Andersen 1999).

Innsamlingsrutiner for mosene og metodetest

De årlige undersøkelserne har startet like etter vårflommen med utplassering av moser der de ikke finnes i naturlige bestander. Siden tas det ut prøver med 2-4 ukers intervaller frem til senhøsten. Prøvene skylles fri for partikler i bekkevannet, lufttørkes og sendes til NIVA hvis det er lokale prøvetakere. På laboratoriet inspiseres alle prøvene (videre fjerning av partikler kan være nødvendig) og de friske grønne årskuddene klippes (1-5 cm) og bearbeides videre til analyse (eldre deler av planten kan ikke brukes da utfelte jern/mangan-oksider på disse deler øker bindingen av tungmetaller betydelig i forhold til i ferske skudd (Johansson 1995). Vi har tidligere testet to metoder parallelt. Den ene metoden innebar at steiner, som mosene naturlig er festet til, ble lagt ut i bekken (eller at de er der naturlig), mens den andre innebar at de nye årskuddene ble klippet først og eksponert i platbokser med nettingåpning mot strømmen. Begge disse metodene ga samme resultat (Rognerud 1994a). Vi valgte å fortsette med moser festet til naturlig substrat (stein eller bunter knyttet til kvister/trerøtter) da disse svært sjelden forsvinner på grunn av flom eller nysgjerrige personer. NIVA har ved enkelte tilfeller tatt parallelle prøver for å sikre at alle lokale prøvetakere gjør et tilfredstillende feltarbeid. Det ble ikke observert avvik av betydning mellom kontrollprøver og rutineprøver innsamlet av lokale prøvetakere i noen av feltene.

Sammenhengen mellom metallkonsentrasjoner i vann og mose

Det ble enkelte ganger i perioden 1993-1997 samlet inn vannprøver parallelt med eksponeringene av mosene for analyser av bly, kobber og andre viktige vannkvalitetsvariable som pH, total organisk karbon (TOC), farge og kalsium-innhold. I 1998 og 1999 ble denne innsamlingen av vannprøver gjort mer systematisk. Prøveflaskene for metallanalysene var spesielt rengjorte og fylt opp med destillert vann for å redusere kontamineringsrisikoen. I enkelte tilfeller i 1993 ble parallelle prøver samlet inn, men det viste seg at disse ga nær de samme resultatene. For å spare analysekostnader gikk vi derfor over til bare å samle inn enkeltprøver. Prøvene ble som hovedregel samlet inn ved utsetting og opptak av moseprøver dvs. med ca. 3-4 ukers mellomrom. Da mosene vil gjenspeile vannkvaliteten over hele eksponeringsperioden, kan det selvfølgelig være forklarlig at en i enkelte tilfeller kan få en mindre god overenstemmelse med resultater fra vannprøver basert på stikkprøver, som kun representerer et øyeblikksbilde. Sammenhengene mellom konsentrasjoner i mose og vann for de ulike feltene presenteres i resultatkapitlet. Ved omregninger fra konsentrasjoner i mose til vann må disse sammenhengene benyttes. Likevel er det viktig informasjon som også fremkommer når hele materialet behandles samlet. Dette er fremstilt i en såkalt "scatterplot matrise" (Fig.2) og en parvis korrelasjonsanalyse (Tab.1).

Resultatene av den generelle analysen viser at:

- Det var signifikante sammenhenger med en høy forklaringsgrad mellom konsentrasjoner av bly i mose og vann, og mellom konsentrasjoner av kobber i mose og vann.
- Det var signifikante korrelasjoner mellom konsentrasjoner av bly og kobber både i vann og i mose. Dette er en sterk indikasjon på at det er korrosjon av kobbermantlede prosjektiler som er kildene, da disse inneholder en gitt andel kobber og bly.
- Konsentrasjonen av jern i mose var signifikant korrelert til bly i mose, men forklaringsgraden var relativt lav. En nærmere analyse av dette viser at ved lave konsentrasjoner av bly i vann var jerninnholdet i mosene av betydning for blykonsentrasjonene. Ved høyere blykonsentrasjoner slik som tilfellet er ved en forurensnings situasjon betyr jerninnholdet lite. For kobber var det ingen sammenheng mellom konsentrasjonene av jern og bly i mose.
- pH og farge (som er et mål på vannets innhold av løste humusforbindelser) var signifikant negativt korrelert. Dette viser at de feltene som hadde den høyeste humuspåvirkningen også jevnt over var de sureste.
- Kombinasjonen surt og humusrikt vann er signifikant korrelert til blykonsentrasjonene i både vann og mose. Dette indikerer at surt humusrikt vann er viktig når det gjelder utløsning og transport av bly fra feltene. Ved en forsurening øker den biotilgjengelig fraksjonen (andelen frie kationer), men dette motvirkes ved en økt konsentrasjon av kompleksdannere representert ved økt innhold av humussyrer. Totalt sett indikerer imidlertid resultatene at den biotilgjengelig konsentrasjonen (representert ved bly i mose) også øker når den totale blykonsentrasjonen i vannet øker.

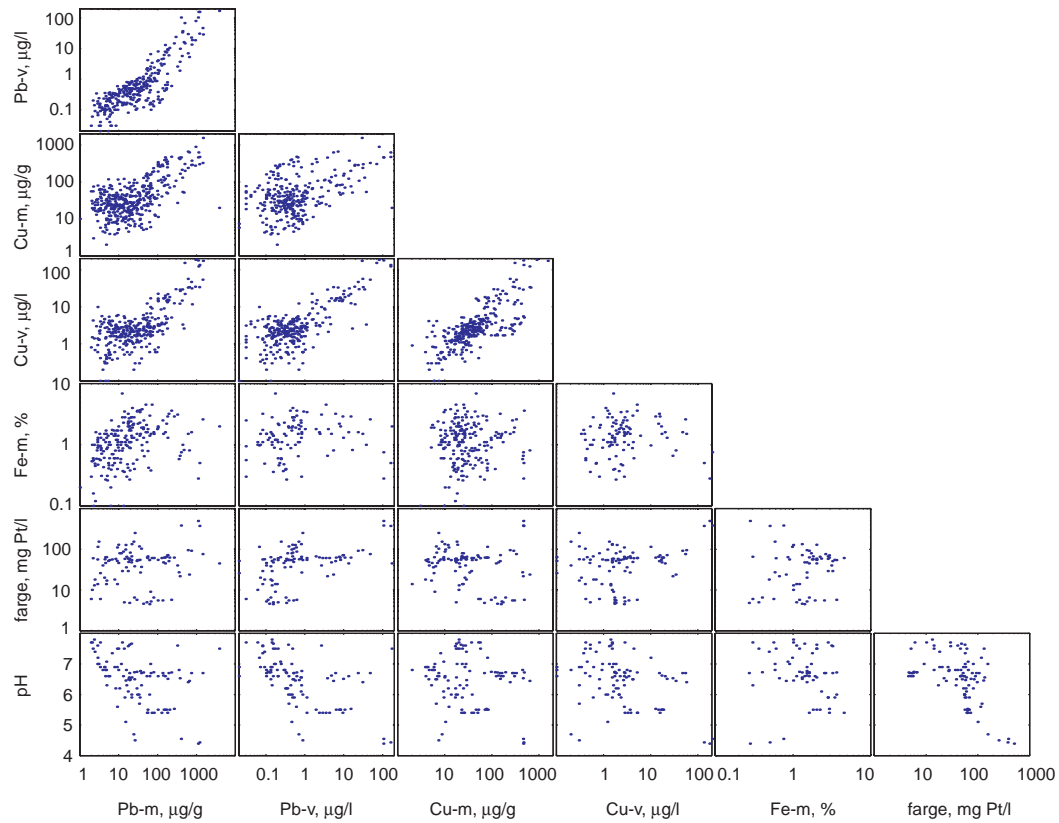
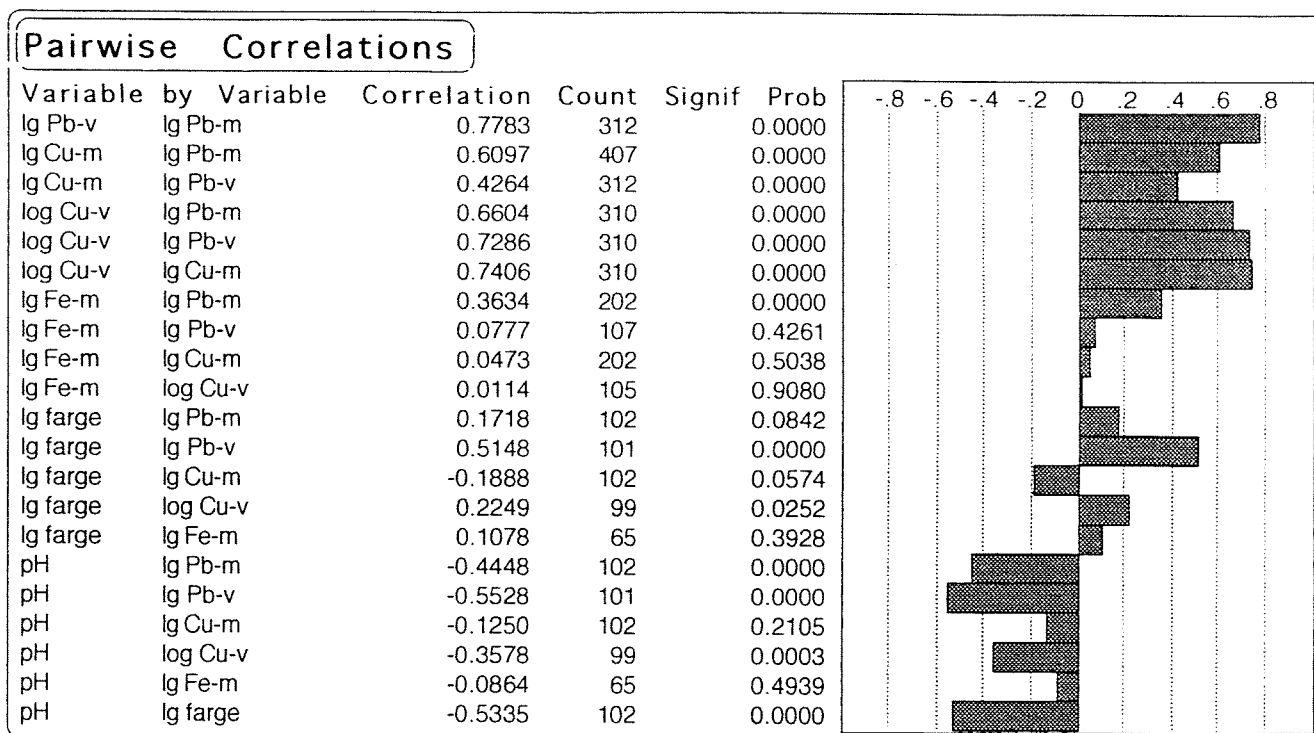


Fig. 2. Scatterplott på log-transformerte data som viser samvariasjonen mellom bly, kobber og jern i mose (Pb-m, Cu-m, Fe-m), bly og kobber i vann (Pb-v, Cu-v) og viktige vannkvalitetsvariable som pH og farge (indikasjon på konsentrasjonen av humussyrer).

Tab.1. Parvis korrelasjonsanalyse basert på log-transformerte data. Forkortelser som i Fig.2.



Generell vannkvalitet og metaller som finnes i forhøyde konsentrasjoner i bekker som avvann skytefelt.

Vannkvaliteten betyr mye for metallenes tilstandsform, korrosjonshastighet av metallholdige fragmenter og transport ut fra deponeringstedet. Generelt kan vi si at de metallene som prosjektilene består av; bly, kobber, antimon og sink forekommer som kationer og løses i større grad i surt vann enn i nær nøytralt vann. Løste humussyrer produseres ved nedbrytning av humustoffer i feltene. De er sterke metallbindere og derved de viktigste transportørene av metaller ut fra feltene. Vannfargen er et godt mål på mengden løste humustoffer i vann. I Figur 3 har vi vist sammenhengen mellom pH og farge i stikkprøver innsamlet i skytefeltene i 1999. Generelt var det en klar tendens til synkende pH verdier ved økende fargeverdier over 20 mg Pt /l. Dette skyldes bl.a humussyrene som bidrar til å senke pH når vannet har liten bufferkapasitet, men også andre syrer kan bidra. Videre var det relativt små forskjeller i vannkvalitet innen hvert felt, med unntak av følgende få stasjoner: Betydelig surere og brunere vann enn de andre stasjonene på feltet for stasjon 2 i Steinsjøfeltet, stasjon 8 på Bradalsmyra og feltskytebanen på Karlstadskogen (Sætermoen), mens stasjon P på Høybukta hadde klarere svakt surt vann. Generelt kan vannet karakteriseres som klart og svakt surt i Mjølfjell-feltet og Lærdals-feltet, klart og svakt basisk i Mauken, Sætermoen og Porsangmoen skytefelt. Videre moderat brunfarget og nær nøytralt i feltene på Bradalsmyra, Hengsvatn, Heistadmoen, Rena, Høybukta, Terningmoen og Ringerike, mens det var brunt og surt på Steinsjøen og Evjemoen.

Vi har undersøkt konsentrasjonene av 50 elementer i 64 vannprøver fra skytefeltene i 1999. Primærdata for et utvalg av disse er gitt i et vedlegg bak i rapporten. Disse resultatene har vi sammenliknet med resultater fra en nasjonal undersøkelse over konsentrasjoner av metaller i innsjøer der atmosfæriske avsetninger er eneste forurensningskilde (Skjelkvåle et al. 1996, Skjelkvåle et al. 1999). Denne sammenlikningen viste at det var bly, kobber, antimon, sink og barium som forekom i høyere konsentrasjoner i vann fra skytefeltene (Figur 4 og Tabell 2).

Tabell 2. Konsentrasjoner ($\mu\text{g/l}$) av barium (Ba), kobber (Cu), bly (Pb), antimon (Sb) og sink (Zn) i vann fra skytefelt (skyt. 64 observasjoner) og for 985 innsjøer fra hele landet (nasj., Skjelkvåle et al. 1999). Resultatene er gitt i form av enkle statistiske mål som maksimum og minimum verdier, prosentiler, medianer, middelveidier, standardavvik og standard feil på middelveidien.

| Metall | Min. | 10-pros. | Median | 90-pros. | Maks. | Middel | St.avvik | St.feil |
|----------|-------|----------|--------|----------|-------|--------|----------|---------|
| Ba-nasj. | 0,05 | 0,6 | 2,4 | 10,8 | 147 | 5,3 | 9,7 | 0,31 |
| Ba-skyt. | 0,05 | 2,0 | 11,5 | 52 | 81 | 19 | 20,3 | 2,54 |
| Cu-nasj. | 0,03 | 0,12 | 0,34 | 1,0 | 38 | 0,54 | 1,54 | 0,04 |
| Cu-skyt. | 0,12 | 0,80 | 3,25 | 33,5 | 280 | 13,5 | 40,0 | 5,0 |
| Pb-nasj. | 0,004 | 0,05 | 0,17 | 0,87 | 15 | 0,42 | 1,0 | 0,033 |
| Pb-skyt. | 0,01 | 0,03 | 0,60 | 16,5 | 179 | 6,9 | 25,1 | 3,13 |
| Sb-nasj. | 0,005 | 0,006 | 0,02 | 0,07 | 0,36 | 0,03 | 0,03 | 0,001 |
| Sb-skyt. | 0,01 | 0,03 | 0,29 | 3,0 | 28 | 1,44 | 4,1 | 0,51 |
| Zn-nasj. | 0,08 | 0,33 | 1,54 | 6,9 | 139 | 3,0 | 6,6 | 0,21 |
| Zn.skyt. | 3,7 | 4,1 | 10,7 | 29 | 239 | 19,7 | 38,7 | 4,83 |

Konsentrasjonene av de 6 elementene i skytefeltene var generelt 3 til 10 ganger høyere enn i innsjøene. De naturlige konsentrasjonene var lavest for antimon. Dette forholdet sammen med prosjektilene inneholder 7% antimon er årsaken til at den relative økningen i konsentrasjonene i bekker fra skytefeltene var størst for dette elementet. Basert på maksimum verdiene var de absolutte forskjellene mellom konsentrasjoner i vann fra de mest belastede skytefeltene og naturlig vann størst for kobber og bly. Det er også verd å merke seg at konsentrasjonene fra de mest forurensede feltskytebanene var nær 200 $\mu\text{g/l}$ både for bly, kobber og sink.

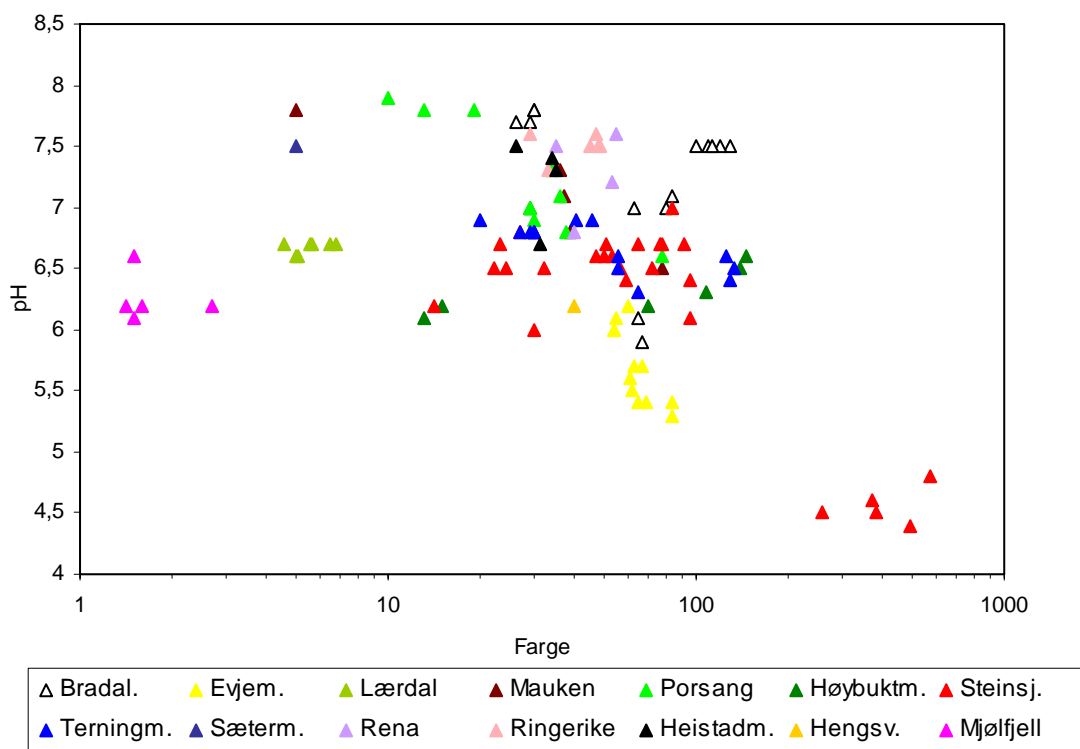


Fig.3 Sammenhengen mellom pH og farge (mg Pt/l) i de ulike feltene.

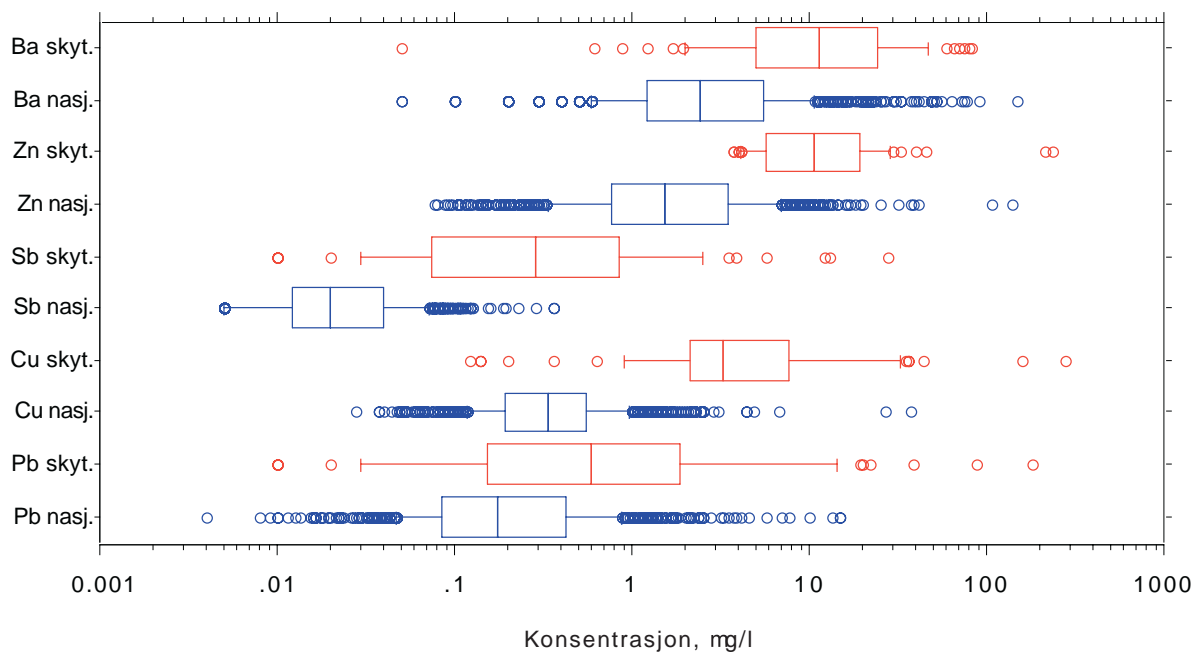


Fig.4 Konsentrasjoner av barium (Ba), kobber (Cu), bly (Pb), antimon (Sb) og sink (Zn) i bekker som avvannet skytefeltene i 1999 (skyt.), og i innsjøer basert på en nasjonal undersøkelse (nasj.) utført høsten 1995 (Skjelkvåle et al. 1996, 1999). I den nasjonale undersøkelsen var atmosfæriske avsetninger eneste kilde til metallforurensninger. Resultatene er gitt i "box-plot" hvor boksen representerer 25 til 75 prosentilene, streken i boksen er medianen (50 prosentilen) og strekene utenfor boksen 10 til 90 prosentilen. Observasjoner utenfor disse er gitt som punkter. n = 63 (skyttefeltene), n = 985 (nasjonale innsjøundersøkelsen).

Kjemiske analysemetoder

Alle analysene av metaller i vann ble utført ved NIVA's akkrediterte laboratorium i Oslo. Det er bare benyttet spesialflasker utsendt fra dette laboratoriet. Kobber og bly i vann ble analysert ved bruk av ICP-MS mens AAS ble benyttet på moseprøvene, og pH og vannfarge ble analysert etter Norsk Standard.

Klassifisering av tilstand

På bakgrunn av konsentrasjonene av miljøgifter som bly og kobber i vann har Statens forurensningstilsyn (SFT) inndelt vannkvaliteten i ulike tilstandsklasser slik som gitt i Tabell 3 (Holtan & Rosland 1992).

Tabell 3. Tilstandsklasser (I-IV) for vannkvalitet basert på konsentrasjoner av enkelte tungmetaller($\mu\text{g/l}$). De ulike klassene er gitt ulike fargekoder (Holtan & Rosland 1992)

| | God (I) blå | Mindre god (II) grønn | Nokså dårlig (III) gul | Dårlig (IV) rød | Meget dårlig (V) fiolett |
|----------------------------|----------------|--------------------------|---------------------------|--------------------|-----------------------------|
| Kobber ($\mu\text{g/l}$) | <2 | 2-5 | 5-15 | 15-50 | >50 |
| Bly ($\mu\text{g/l}$) | <1 | 1-3 | 3-5 | 5-10 | >10 |

På bakgrunn av tilstandsgrensene i denne tabellen og regresjonene mellom konsentrasjonene i vann og mose for de ulike feltene kan tilstandsklasser og fargekoder for konsentrasjoner i mose defineres. I alle presentasjonene fra de ulike skytefeltene er denne fargekoden og ovennevnte grenser benyttet. Hvert målepunkt (stasjon) som er vist i figurene representeres ved en middelværdi i de ulike årene.

Resultater fra overvåkningen av bly og kobber i vannmoser. Bradalsmyra

Innledning

Bradalsmyra er skytefelt og testplass for Nammo Raufoss AS. Området dreneres av Veltmannåa og to mindre bekker som ikke ligger i Veltmannåa's nedbørfelt (Fig.5A). Feltet ble tatt i bruk for prøveskyting av ammunisjon i 1918, men det var først i midten av 50-årene at aktiviteten ble mer omfattende. Bruken har i den senere tid endret karakter slik at prøving, kontroll og produktutvikling er hovedaktiviteten i dag. Dette innbefatter en mangesidig aktivitet med potensiell forurensningsfare av bl.a tungmetaller. Testskyting av ammunisjon for håndvåpen skjer i et delvis lukket anlegg på fabrikkområdet slik at Bradalsmyra i dag er lite belastet med prosjektiler fra håndvåpen. Undersøkelsene på Bradalsmyra har foregått siden 1991. Det er utgitt flere rapporter som omhandler resultatene fra disse undersøkelsene (Kjellberg & Røgnerud 1992, Røgnerud 1993, 1994a, 1996, 1997, 1998, 1999). Fra og med 1993 er det 4 stasjoner som er blitt undersøkt på Bradalsmyra.

Resultater

Det var klare sammenhenger mellom konsentrasjoner i mose og vann for bly og kobber (5B). Ved såvidt lave konsentrasjoner er det imidlertid vanlig å observere en del spredning vesentlig på grunn av usikkerheter knyttet til representativiteten av vannprøvene, men også på grunn av varierende andel jernoksider (effektive metallbindere) som kan avsettes på mosebladene. Med unntak av de små bekkene, st.7 og 8 som avvanner de østligste områdene (der bl.a bygningsmassene ligger) henholdvis i 1993 og 1997, så har konsentrasjonene av bly og kobber i bekkene som renner ut av feltet vært relativt lave i hele overvåkingsperioden (5C). Forurensningskilden til de høge verdiene ved st.8 i 1997 er fjernet, og konsentrasjonene har siden vært tilbake til normalt nivå. Det har også generelt sett vært en ubetydelig økning i konsentrasjonene av bly i Veltmannåa fra utløpet av Veltmannåa (st.1) til skytefeltets grense (st. 4), men konsentrasjonene var lave og vannkvaliteten i så henseende må sies å ha vært god i hele observasjonsperioden.

Konklusjon

Vannkvaliteten kan betegnes som god med hensyn til bly og kobber i Veltmannåa der den renner ut av feltet. Konsentrasjonene var nær de som observeres ved utløpet av Veltmannåa. Dette viser at bidraget av forurensninger for disse elementene var ubetydelig, og feltet forurenser ikke vassdraget nedstrøms nevneverdig. I 1993 var det mindre god vannkvalitet i bekken som avvanner hovedstandplass, men denne situasjon har bedret seg etter hvert med verdier nær de naturgitte siden 1995. Vannkvaliteten med hensyn til bly var mindre god i bekken som avvanner miljøtestanlegget i 1997, men situasjonen har siden vært normalisert. Konsentrasjonene av bly og kobber var høyere i bekkene som avvanner testsenteret enn de som oftest observeres i norske innsjøer, men vannkvaliteten kan generelt klassifiseres som god til mindre god. Selv om det har vært enkelte utslippsepisoder ser det ut til at forholdene er under kontroll med hensyn til utslipp av bly og kobber fra Bradalsmyra skytefelt.

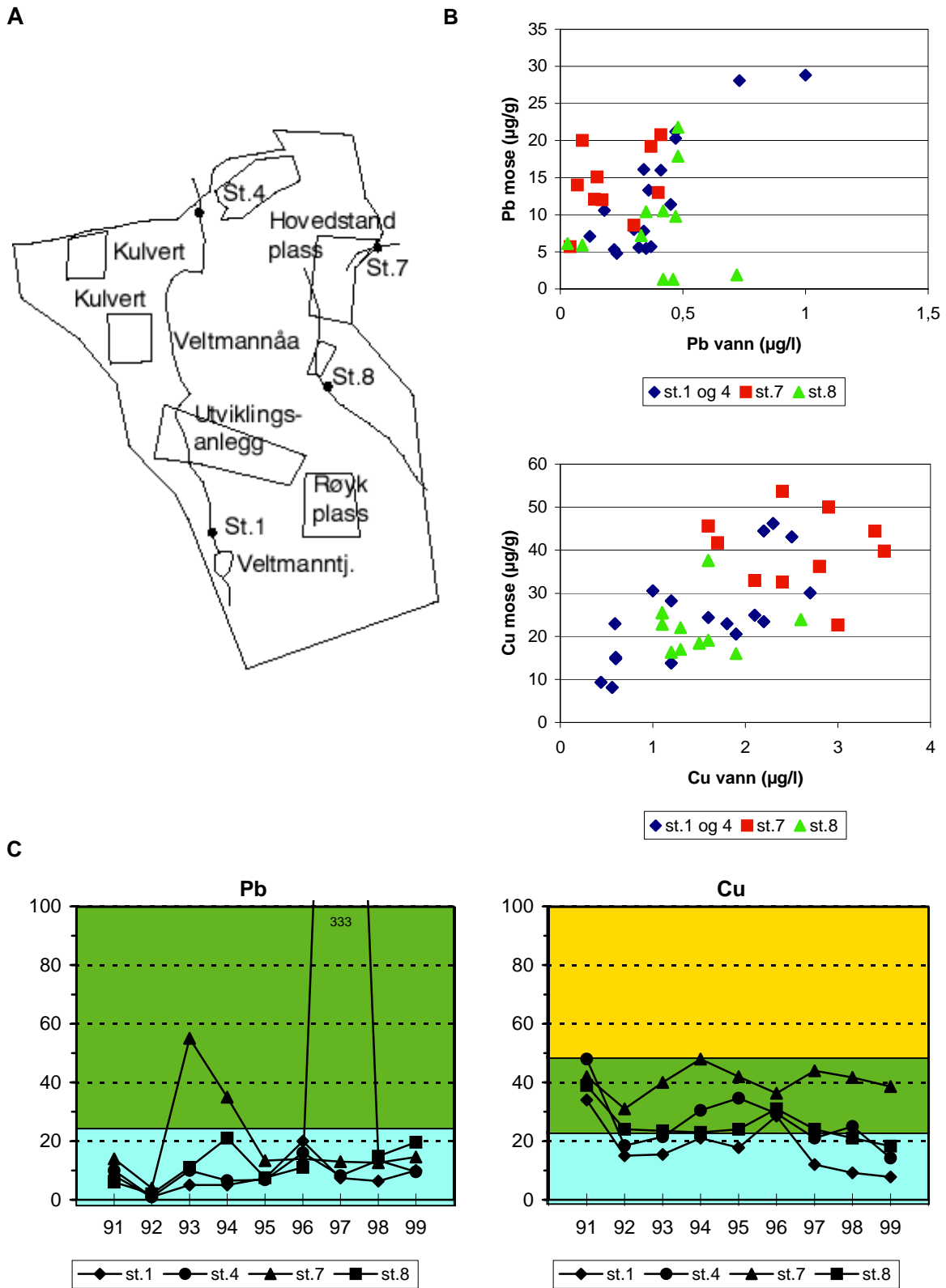


Fig.5. A. Prøvetakningstasjoner på Bradalsmyra test- og utviklingsanlegg. B. Sammenhengen mellom konsentrasjoner av kobber og bly i vann og mose. C. Konsentrasjoner ($\mu\text{g/g}$ tørrvekt) av kobber og bly i mose gitt som årlige aritmetiske middeler for overvåkingsperioden.

Evjemoen

Innledning

Evjemoen er standkvarter for Infanteriets øvningsavdeling nr. 2 (IØ2). Skyte- og øvningsområdet omfatter ca. 9000 mål og er i Forsvarets eie. På bakgrunn av befaringer og orienterende undersøkelser i 1991 ble overvåkingen lagt til bekken som avvanner feltskytebanen og bekken som avvanner kulefangervollene ved Steinsfjellet. Det var disse områdene som hadde de største potensielle forurensningsfarene og de høyeste metallkonsentrasjonene i avrenningsvannet. I tillegg til dette ble konsentrasjonene overvåket i en naturlig voksende mosebestand der Bjoråa renner ut av skytefeltet (Fig.6A). I Bjoråa og tilrennende bekker er det stedvis dumpet kalk som et ledd i fiskestelltiltak. Dette gjør at vannet innen skytefeltet er mindre surt enn ukalka områder i omegnen.

Resultater

Sammenhengen mellom konsentrasjonene i mose og vann for både bly og kobber var meget god (Fig.6B), men stigningsforholdet mellom konsentrasjonene i mose og vann var noe lavere for resultatene fra feltskytebanen. Det er rimelig å anta at dette skyldes at en større andel av total konsentrasjonen er bundet til humuspartikler ved denne stasjonen. Det generelle mønsteret er at konsentrasjonene av bly og kobber økte fra 1991 og fram til 1996, men at de siden har avtatt noe (Fig.6C). Konsentrasjonene i bekken som avvanner feltskytebanen, har i alle år vært høyere enn i bekken som avvanner kulefangervollene. Økningen i bekken fra feltskytebanen var betydelig i perioden 1994 til 1996. Feltskytebanen ligger i Bjoråa's nedbørfelt, og det er rimelig å anta at den gradvise økning av både bly- og kobber-konsentrasjonene som er målt i Bjoråa, skyldes denne utviklingen. Siden 1996 har konsentrasjonene generelt avtatt ved alle stasjonene og vannkvaliteten i 1999 kan klassifiseres som god i Bjoråa, god til mindre god i bekken fra kulefangervollene og nokså dårlig til meget dårlig i bekken fra feltskytebanen. Vi kan også nevne at nikkelskonsentrasjonen var 5-10 µg/l i bekken som avvanner kulefangervollene. Dette skyldes høyst sannsynlig utlekking fra nikkelslagget som er brukt som fyllmasse på kulefangervollene.

Vannet i bekkene som avvanner Evjemoen skytefelt har tidligere vært karakterisert som svakt surt og svært humuspåvirket (Rognerud 1996). Utløsningen av metaller fra deponerte prosjektiler i jord og myrer er antagelig effektiv i dette feltet. Bly og kobber bindes til humus som siden lekker ut i bekken og transporteres nedover i vassdraget. De naturgitte forholdene er derfor ugunstige med hensyn til å holde metallene bundet på deponeringsplassen. Det kan derfor være gunstig å hindre erosjon av deponiene og forsette å kalke deponeringsområdene for å redusere korrosjonshastigheten.

Konklusjon

Det var en negativ utvikling med hensyn til metallforurensninger (både kobber og bly) i bekkene fra skytefeltet på Evjemoen fra 1994 og fram til 1996. For bekken fra feltskytebanen skyltes dette gravearbeidene i forbindelse med oppgraderingen av banen i 1994. Selv om konsentrasjonene av bly og kobber har vært lavere de siste årene, er vannkvaliteten i bekken fortsatt meget dårlig. Dette viser at endrede dreneringsforhold i feltskytebanen kan gi høyere konsentrasjoner i avrenningen lenge etter at inngrepet er gjort. Så langt som mulig bør en unngå å grave i deponiene, da dette mobiliserer kobber og bly-komplekser som ellers ville forblitt på deponistedet. Mengden av humus-metall komplekser kan være betydelig etter mange års bruk av banen. Det er ennå ikke gjort effektive tiltak for å stanse utlekking av metaller fra feltskytebanen. Alle inngrep som vil redusere oppholdstiden av vann i dette feltet, vil føre til økt mobilitet av kobber-, og bly-humuskomplekser. Dette vil ha betydning for vassdraget nedstrøms slik det også er registrert i Bjoråa ved utløpet av feltet. Vi ser at utviklingen i Bjoråa følger nøye utviklingsmønsteret i konsentrasjonene i bekken fra feltskytebanen. Dette er slik som en teoretisk skulle forvente, og viser at metoden for å måle metallkonsentrasjoner i avrenning er god. Det viser imidlertid også at bindingsgraden i bekket vann kombinert med økende fortynning på grunn av tilkommende bekker reduserer blykonsentrasjonene betydelig før utløpet av Bjoråa i Nidelva. I bekken som avvanner kulefangervollene, snudde den negative utviklingen for bly i 1996 etter en tid med gravearbeid og konsentrasjonene har siden gradvis sunket. Vi vil foreslå at feltskytebanen kalkes og at nikkelslagget i kulefangervollene byttes ut med masser som ikke forurenser.

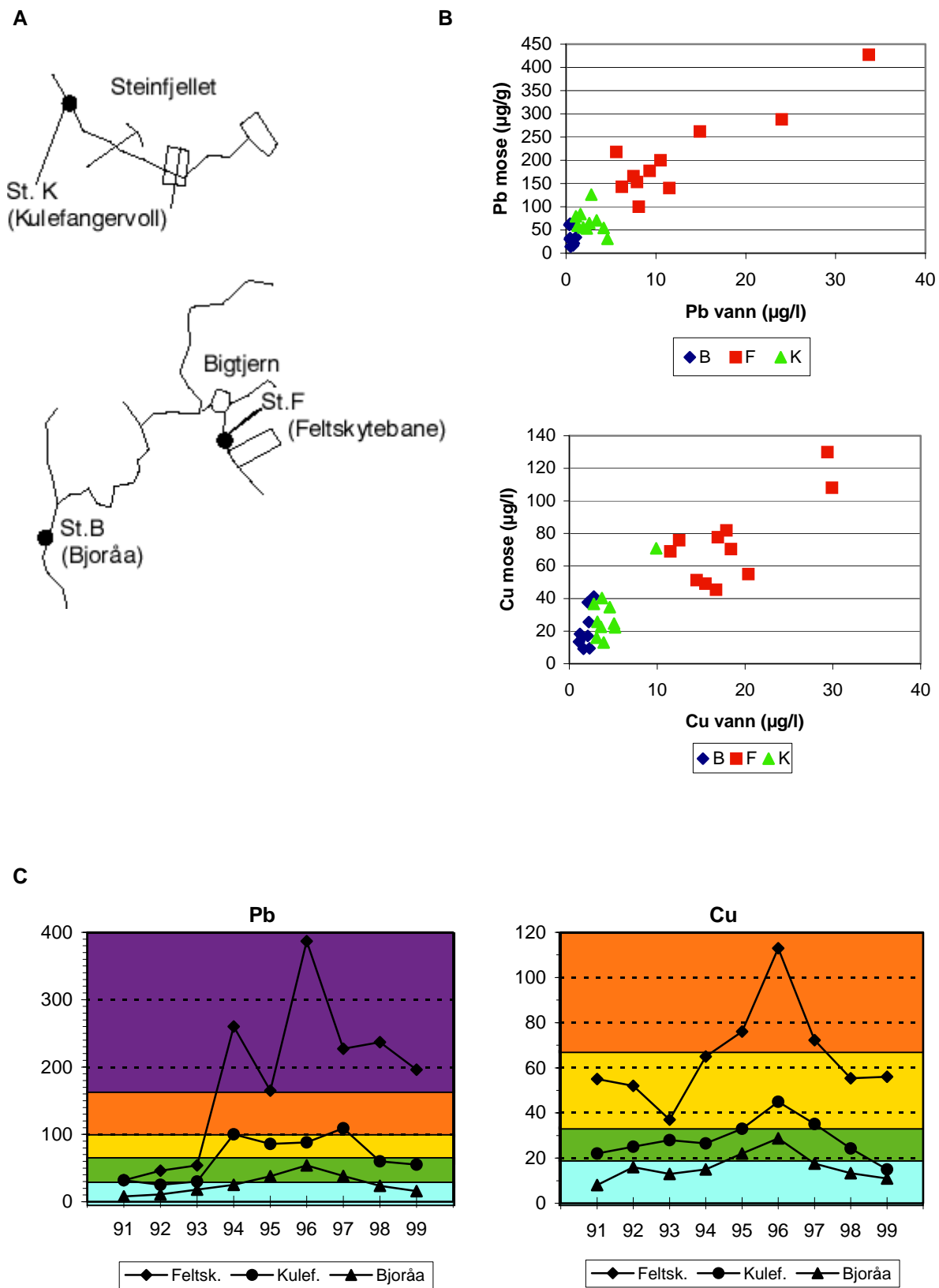


Fig.6. A. Prøvetakningstasjoner på Evjemoen. B. Sammenhengen mellom konsentrasjoner av kobber og bly i vann og mose. C. Konsentrasjoner ($\mu\text{g/g}$ tørrvekt) av kobber og bly i mose gitt som årlige aritmetiske middeler for overvåkingsperioden.

Steinsjøfeltet

Innledning

Dette feltet er fjernøvningsfelt for avdelinger i det sentrale Østlandsområdet. Feltet er et leiet privat område og er i alt på 11300 da. Området ble nøye befart i 1991, og flere orienterende prøver ble analysert. På bakgrunn av disse ble det antatt at problemer i forbindelse med avrenning av bly og kobber i hovedsak var knyttet til de østligste feltskytebanene beliggende i Larsmyrdalen og dreneres av Larsmyrbekken som renner ut i Brenntjern (Fig.7A). Stikkprøver tatt i 1995 viste at banene rundt Storvatnet også hadde høge konsentrasjoner av bly og kobber, og det ble besluttet å inkludere også disse bekkene i overvåkingen. Det er grunn til å anta at dette feltet har noen av Forsvarets mest benyttede feltskytebaner. Analysene av vegetasjon på feltskytebanen har vist en betydelig anrikning av bly (Rognerud et al. 1992). Det er i hovedsak prosjektiler fra handvåpen som deponeres i feltet. En undersøkelse i Storvatnet viste at konsentrasjonene av antimon (Sb), bly (Pb) og kobber (Cu) i overflatesedimentet var betydelig høyere enn i det pre-industrielle referansesedimentene, og at dette skyltes korrosjon av prosjektiler (Rognerud 1996).

Resultater

Vannkvaliteten var generelt dårlig til meget dårlig i bekkene på Steinsjøfeltets østre deler (Fig.7B og C). Det var også generelt en god sammenheng mellom konsentrasjoner av bly og kobber i mose og vann på de respektive stasjonene, selv om spredningen var stor og opptakseffektiviteten i mosene var lav på st. 2 grunnet høgt humusinnhold og derav liten biotilgjengelig fraksjon. I Larsmyrbekken (st.1) økte konsentrasjonene av kobber i mose jevnt fra 1991 og fram til 1999. Fra overvåkingen startet i 1991 og frem til 1999 har konsentrasjonen i mose økt til det 4-dobbelte. Konsentrasjonene av bly i mose steg jevnt fra 1991 til 1994, etterfulgt av tre år med stabilitet for så å øke til de høyeste verdiene som er målt i 1999. Sommeren 1996 ble en kalksperre bygd som skulle redusere utlekkingen av metaller fra det nærmeste holdet på den nederste feltskytebanen. Dette ga imidlertid ikke de ønskede effektene og våren 1999 ble hele nærstridsområdet kalket med ca. 1,5 tonn granulat. Konsentrasjonene i utløpsbekken fra Brenntjernet (st.A) økte markert i 1996 antagelig på grunn av gravearbeider som førte mye partikler ut i bekken, men sank de følgende to årene for så å stige i 1999 til det høyeste nivået som er målt. Reduksjonene i konsentrasjonene av bly og kobber fra Larsmyrbekken til utløpsbekken fra viser at tjernet fungerer som en effektiv felle for bly- og kobberforurensningen fra Larsmyrdalen. Konsentrasjonene i Larsmyrbekken var så høge at det er store sjanser for gifteffekter på akvatiske organismer. Vannføringen i bekken som avvanner banene 5/6 (st.2) var liten, men konsentrasjonene var høge, og de har holdt seg på et høgt nivå særlig etter grøftingen på myra foran standplass. Bekken som avvanner den store PV-banen (st.3) har lite humus, høy opptakseffektivitet i mose og meget dårlig vannkvalitet.

Konklusjon

Vannkvaliteten på alle målestasjonene må karakteriseres som dårlig eller meget dårlig. Konsentrasjonene var i 1999 meget høye og langt over de naturgitte. Gifteffekter på akvatiske organismer kan forventes. Selv om det i perioden 1996 til 1998 skjedd en liten nedgang i konsentrasjonene har utviklingen generelt vært negativ med en tendens til stadig økende konsentrasjoner. Dette skyldes blant annet endrede avrenningsforhold forårsaket av gravearbeider som har blitt gjort i feltet i overvåkningsperioden, men også nedbørrike somre (som i 1999) kan medvirke til økt utlekking. Humus-metall komplekser mobiliseres og transporteres lettere ut i bekken enn tidligere. Humusstoffene virker som transportører for metallene som siden kan frigjøres eller inngå i næringskjeden i andre deler av nedbørfeltet. Den kalksperren som ble laget sommeren 1996 for å redusere utlekkingen fra det nederste deponiet i Larsmyrdalen ga ikke de forventede resultatene. Dette skyldtes at vannet i hovedsak rant over kalklaget og ikke igjennom slik som forutsatt. Kalkingen av dette nærstridsområdet våren 1999 ga heller ingen positiv effekt om sommeren. Den generelle trenden med økninger i konsentrasjonene i alle bekkene på feltet i 1999 kan indikere at den nedbørrike sommeren dette året, har medvirket til en større transport og konsentrasjon av metall-humus komplekser enn normalt. Utviklingen i forurensningsgraden av bekkene på Steinsjøfeltet bør overvåkes nøye. Det er spesielt viktig å undersøke om kalkingen vil ha en positiv effekt etter en tid, eller om for mye allerede er knyttet opp i metall-humuskomplekser som forsetter å renne ut i bekken.

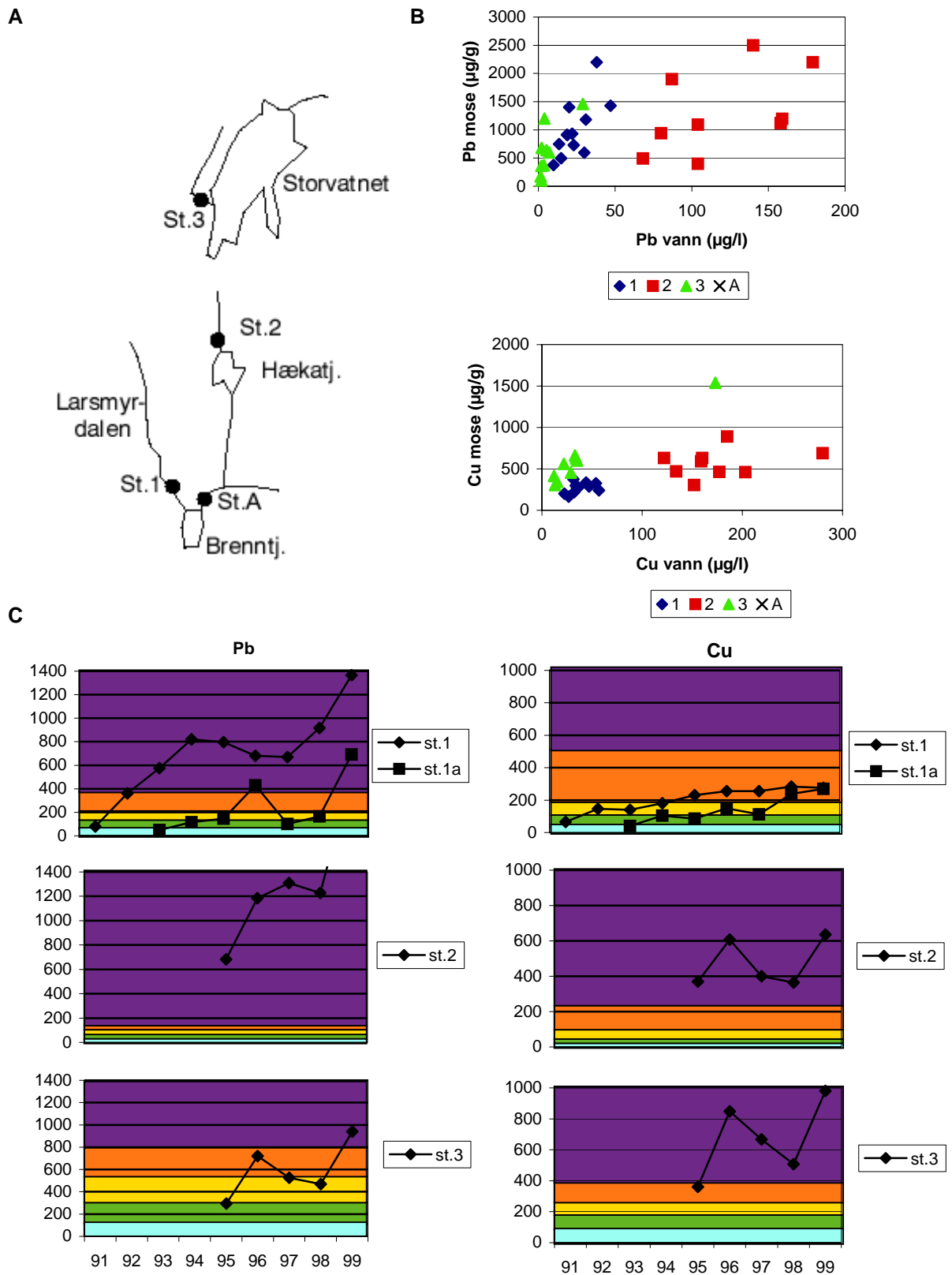


Fig.7. A. Prøvetakningstasjoner på Steinsjøfeltet. B. Sammenhengen mellom konsentrasjoner av kobber og bly i vann og mose. C. Konsentrasjoner ($\mu\text{g/g}$ tørrvekt) av kobber og bly i mose gitt som årlige aritmetiske middeler for overvåkingsperioden.

Terningmoen

Innledning

Terningmoen skytefelt er Forsvarets eldste skytefelt som fortsatt er i bruk. Området har noen av landets mest benyttede skytebaner. Det skytes med handvåpen, raketter, granater og bombekastere. Hovedaktiviteten foregår i et skogsområde som avvannes av flere mindre bekker som renner ut i Terninga. Overvåkningsundersøkelsen omfatter tre stasjoner i Terninga og tre stasjoner i de viktigste bekkesystemene (Fig.8A). I de tre siste årene har også en tilleggstasjon (T3) oppstrøms T1 vært undersøkt på grunn av misstanke om avrenning fra en lerduebane. Terningmoen skytefelt har tidligere vært undersøkt mer inngående både i 1990 og i 1992. I disse undersøkelsene ble det avklart at bly, kobber, sink og jern fra skytefeltet forurenset bekkene som avvannet de mest benyttede feltskytebanene. Konsentrasjonsøkningene var imidlertid moderate, og ingen skadeeffekter ble registrert på det akvatiske plante- og dyrelivet i Terninga.

Resultater

Sammenhengen mellom konsentrasjoner av bly og kobber i mose og vann viste at konsentrasjonene i vannfasen var relativt lave, og spredningen stor, antagelig på grunn av innvirkning av jernoksider på mosene og usikkerhet med hensyn til representativitet av vannprøvene (Fig 8B). Konsentrasjonene av kobber og bly i bekkene (B1, B2, B3) var gjennomgående noe høyere enn i Terninga (T1) like før samløpet med bekkene (Fig. 8C). Konsentrasjonene av bly var imidlertid betydelig høyere (4-5 ganger) i Terninga et stykke oppstrøms (T 3), mens derimot kobberverdiene var lavere enn i Terninga ved Terningmoen (T1 og T2). Dette er en klar indikasjon på avrenning fra en blykilde, mest sannsynlig den lokal lerduebanen som ligger nær Terninga oppstrøms T3 (hagl består av bly og ikke kobber). Konsentrasjonene i bekkene varierer en del fra år til år, sannsynligvis på grunn av store variasjoner i vannføringen. Det var ingen systemisk tendens til endringer i konsentrasjonene av betydning. Konsentrasjonen av kobber derimot synes å gradvis avta i Terninga, mens situasjonen er mer status quo for bly. Vannkvaliteten i Terninga kan betegnes som god før bekkene tilkommer, mens den etter samløp med bekken (T2) ligger i overgangsonen til klassen mindre god.

Konklusjon

Vi har ikke registrert dårlig vannkvalitet, som følge av utlekking av bly og kobber fra korroderte prosjektiler, på Terningmoen siden overvåkingen startet for 9 år siden. Situasjonen har vært relativt stabil når en tar hensyn til de år til år variasjoner i metall- konsentrasjoner en kan ha som følge av naturlige variasjoner i vannføring. De noe høyere konsentrasjonene i bekkene som avvanner skytefeltet har liten betydning for vannkvaliteten i Terninga. Konsentrasjonene i 1999 var nær de samme som ble registrert da overvåkingen startet i 1991 med unntak av kobberkonsentrasjonen i Terninga som gradvis har sunket. Selv om konsentrasjonene likevel var noe høyere enn de en vanligvis observerer i norske innsjøer kan vannkvaliteten i feltet generelt karakteriseres som god.

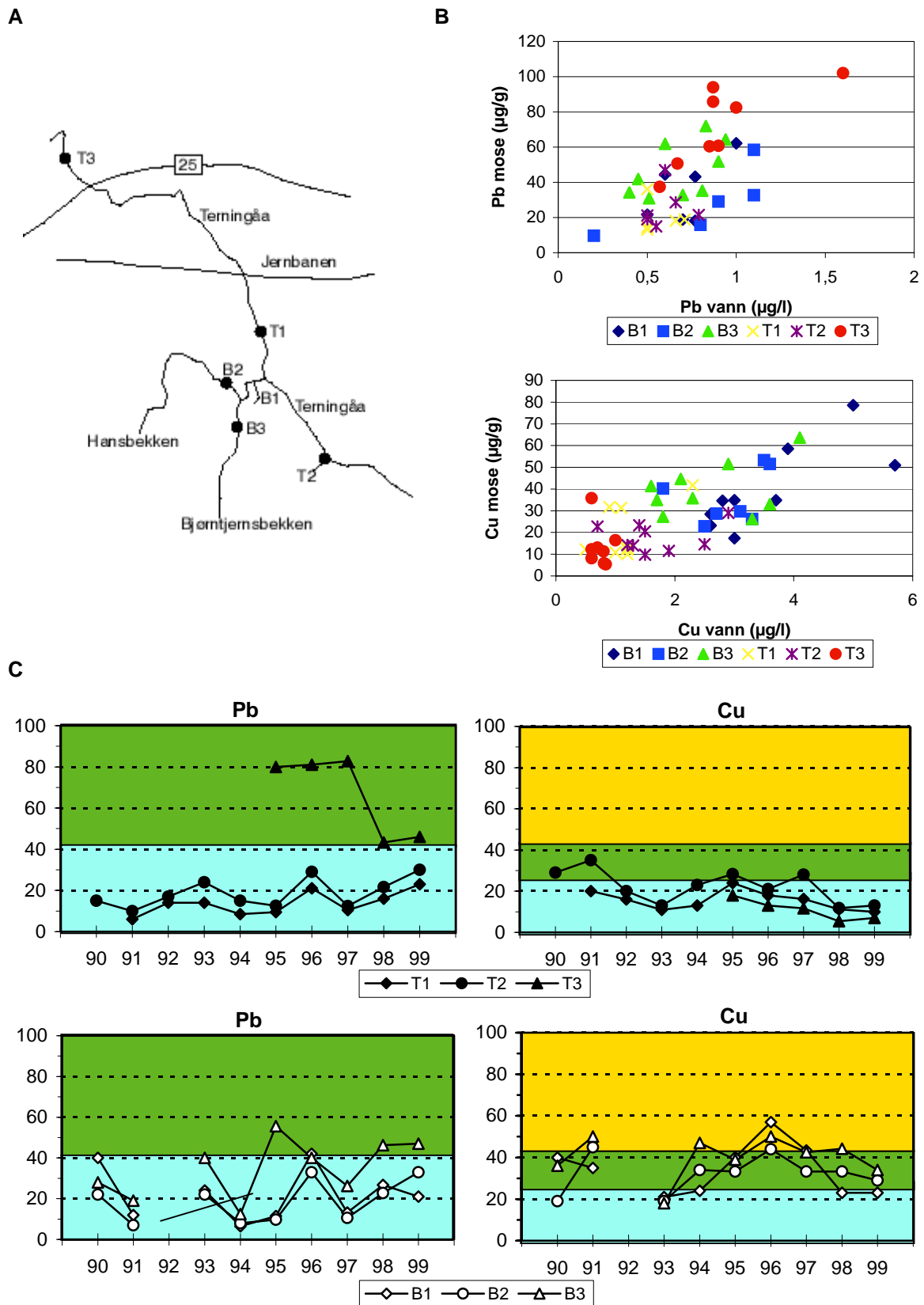


Fig.8. A. Prøvetakingstasjoner på Terningmoen. B. Sammenhengen mellom konsentrasjoner av kobber og bly i vann og mose. C. Konsentrasjoner ($\mu\text{g/g}$ tørrvekt) av kobber og bly i mose gitt som årlige aritmetiske middeler for overvåkningsperioden.

Mauken

Innledning

Skjold-området ble i likhet med de fleste tettsteder i Troms nytt til forlegning av tyske avdelinger under siste krig. Oppbygging av området til bruk for norske avdelinger fant sted i forbindelse med opprettelsen av Brigaden i Nord-Norge (BrigN). Helt fra etableringen i 1954 har området vært standkvarter for en infanteribataljon og ingeniørkompaniet, senere Ingeniørbataljon (Ingbn/N). I tillegg er nå også en oppklarings-eskadron forlagt i området. Skyte- og øvingsfeltet, som ligger på Mauken nord for Skjold, er idag på ca 52000 da. Overvåknings-undersøkelsen ble gjennomført i 4 delnedbørfelter og på totalt 8 stasjoner inklusive en referanse stasjon (Fig.9A).

Resultater

Sammenhengen mellom konsentrasjonene av bly og kobber i mose og vann var god og variasjonen relativt liten antagelig på grunn av en relativt stabil vannkvalitet med lite humus og nær nøytral pH (Fig.3 og 9B). I hele overvåkningsperioden har konsentrasjonene av bly og kobber vært relativt lave og stabile på de aller fleste stasjonene. Likevel har stasjon 3 (foran selvanviserene) i flere år vært betydelig forurenset av bly og både stasjon 1 og 7 hadde relativt høge kobberverdier i 1999 (Fig.9C). I forhold til referanseverdiene var det et påslag i konsentrasjonene for kobber og bly på de fleste stasjonene, med unntak av stasjonene 4 og 5 som ikke var forurenset. Dette er forklarlig da disse banene i liten utstrekning benyttes til skyting med handvåpen. For de andre banene kan vi si at vannkvaliteten generelt kan karakteriseres som god til mindre god.

Konklusjon

Bekkene i skytefeltet på Mauken tilføres lokale forurensninger av bly og kobber som følge av skyting spesielt med handvåpen, men betydningen av disse tilførselene i bekkene som drenerer området, er beskjedent. Vannkvaliteten i bekkene fra de mest belastede banene kan generelt klassifiseres som mindre god til nokså dårlig for kobber og god for bly. Situasjonen har vært relativt stabil i hele overvåkningsperioden, med unntak av høge blyverdier i bekken som avvanner selvanviserene og høge kobberverdier i 1999 ved stasjonene 1 og 7. Dette sistnevnte skyldes antagelig anleggsvirksomhet i felter som normalt deponerer kobberfragmenter og ikke benyttes til handvåpen. Skytefeltet forurenser ikke bekkene som renner ut av feltet nevneverdig, hovedsaklig fordi vann fra et stort nedbørfelt gir en effektiv fortykning av metallutsigene.

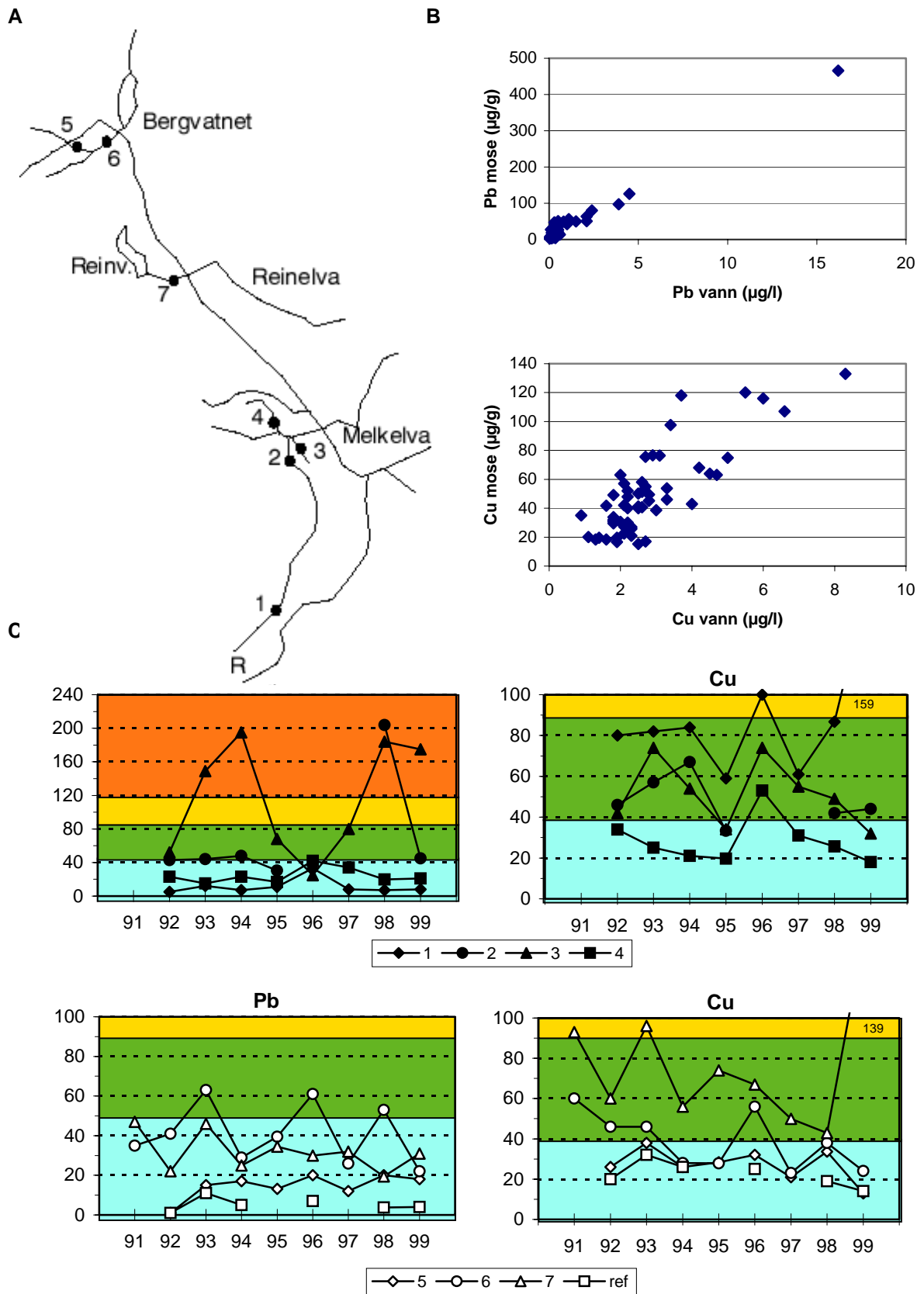


Fig.9. A. Prøvetakningsstasjoner på Mauken skytefelt. B. Sammenhengen mellom konsentrasjoner av kobber og bly i vann og mose. C. Konsentrasjoner ($\mu\text{g/g}$ tørrvekt) av kobber og bly i mose gitt som årlige aritmetiske middel for overvåkingsperioden.

Porsangmoen

Innledning

Området Lakselv/Banak/Skoganvarre var, før den tyske tilbaketrekning fra Finnmark i 1944, forlegningsområde for sentrale deler av en tysk divisjonskommando. Ved tilbaketrekning fra Finland ble store deler av de tyske styrker dirigert til området. I den første tiden etter frigjøringen ble de norske styrkene etablert i Skoganvarre øst for Porsangmoen. Garnisonstedet Porsangmoen er blitt kontinuerlig utbygd fra 1950. I hovedsak skjedde de store utbyggingene i perioden 1969-78. I tillegg er tildels store utbygginger blitt gjennomført i de siste årene. På det meste har en bataljonsgruppe med infanteribataljon, ett middelstungt feltartilleribatteri, stridsvogntropp og luftvern batteri vært forlagt i området. Området er mye benyttet som repetisjonssenter. Porsangmoen og Halkavarre skyte- og øvningsfelt er et av Forsvarets største felter på i alt 318000 da. Området er i sin helhet eid av Staten.

Forundersøkelsene i 1991 viste at Porsangmoen skytefelt hadde naturlig stor variasjon i de geokjemiske (naturgitte) konsentrasjonene av kobber. Spesielt høge konsentrasjoner var det i områdene oppstrøms Yngelvatn noe som ble dokumentert ved sedimentundersøkelsene i tjernene. Det finnes flere gamle kobberskjerp i området. Lokaliseringen av stasjonsnett er vist i Fig.10A.

Resultater

Det var en god sammenheng mellom konsentrasjonene av bly og kobber i mose og vann for alle stasjonene på Porsangmoen (Fig. 10B). I hele overvåkingsperioden har vannkvaliteten vært god i Andersbekken før den renner ut i Nedrevatn (Fig.10C). Da denne bekken avvanner de mest brukte skytebanene, viser dette at utløste metaller som følge av korrosjon av deponerte prosjektiler, i liten utstrekning tilføres vassdraget, men bindes i jordsmonnet. Det har vært episoder med forhøyde blyverdier blant annet ved utløpet av Yngelvatnet i 1994 (st.6). Dette hadde sammenheng med kjøring i stridsløypa som økte erosjonen betydelig og gav Yngelvatnet et sterkt humuspreg i perioder (Curt Dahle personlig meddelelse). Situasjonen var imidlertid normalisert i 1997 og 1998 både for bekken som avvanner stridsløypa (st.7) og ved utløpet fra Yngelvatn (st.6). Utløpet av Røyevatnet (st.8) hadde forhøyde verdier i 1996 som en følge av en negativ utvikling som startet i 1994. Fra tidligere undersøkelser vet vi at sedimentene i dette tjernet er sterkt forurenset av bly bl.a. på grunn av selvanvisere utsatt på isen vinterstid. Det er mulig at det var denne aktiviteten kombinert med tidligere forurensninger som var årsaken. Konsentrasjonene har vært noe lavere de siste årene og nærmer seg situasjonen ved starten av overvåkingen.

Konklusjon

Det var gode sammenhenger mellom konsentrasjonene av bly og kobber i mose og vann for alle stasjonene i skytefeltet. Dette skyldes blant annet at den generelle vannkvaliteten i feltet er godt egnet for bruk av mose som biomonitører (humusfattig nøytralt vann). Overvåkingen har vist at skyteaktiviteten i området fra feltskytebanen ved Gjeddevannet og ned til 200 m-banen, før utløpet i Nedrevannet, ikke har forurenset Andersbekken nevneverdig med bly og kobber. Hovedårsaken er antagelig at jordsmonnet i området er relativt kalkholdig. Dette indikeres blant annet ved at bekkevannet er godt bufret med svakt basisk reaksjon. Et slikt miljø betinger en svært lav korrosjonshastighet av prosjektiler og høg bindingskapasitet overfor disse metallene i jord. Et lavt humusinnhold i denne delen av feltet viser at mengden bæreparkler (humus-metall-komplekser) er lavt. Dette er også et forhold som betinger redusert uttransport av metaller. Skyting mot selvanvisere på Røyevatnet og kjøring i stridsløypa viste at enkelte aktiviteter kan øke metallavrenningen betydelig. Tiltak for å redusere utlekkingen av metaller i bekken som avvanner stridsløypa ble satt i verk (kalking), og dette ga de forventede resultatene med lavere konsentrasjoner. Bekken som avvanner stridsløypa (st.7) er imidlertid lett utsatt for erosjon av metallholdige humuspartikler og vi antar at den økningen som fant sted i 1999 skyldes dette. Med unntak av disse tilfellene har overvåkingen vist at situasjonen har vært relativt stabil de 9 årene overvåkingen har pågått. Særlig gjelder dette vannkvaliteten i Andersbekken. Generelt må vannkvaliteten betegnes som god ved alle stasjonene fra og med Gjeddevatn og nedstrøms, mens den var mindre god oppstrøms. Dette sistnevnte skyldes ikke bare avrenning fra korroderte prosjektiler, men de geologiske formasjonene i området som har et naturlig høgt kobberinnhold.

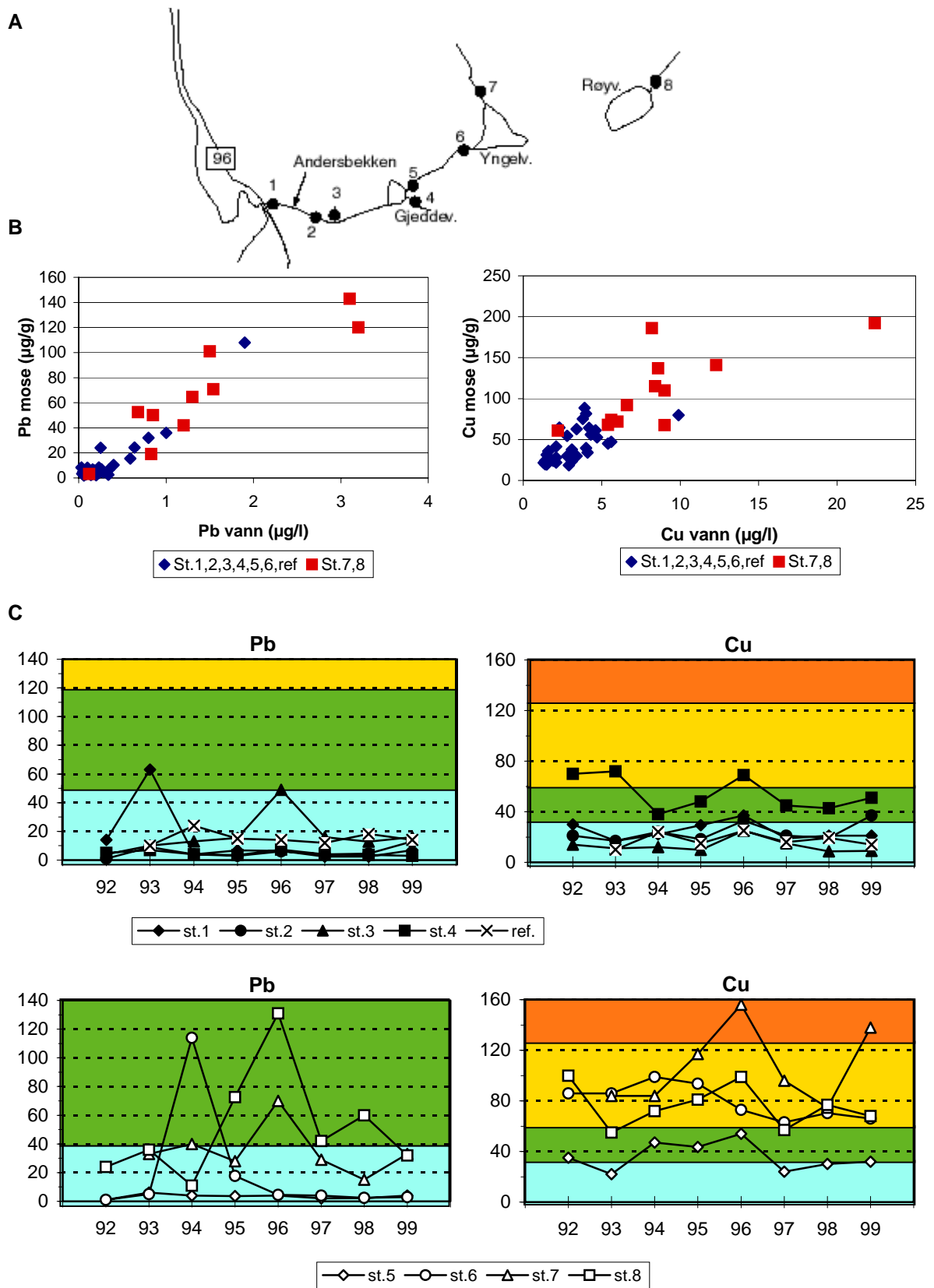


Fig.10. A. Prøvetakningsstasjoner på Porsangmoen skytefelt. B. Sammenhengen mellom konsentrasjoner av kobber og bly i vann og mose. C. Konsentrasjoner ($\mu\text{g/g}$ tørrvekt) av kobber og bly i mose gitt som årlige aritmetiske middeler for overvåkningsperioden.

Lærdalfeltet

Innledning

Demoleringsfeltet i Lærdal ligger i Øyridalen og avvannes av elva Nivla (Fig.11A). Feltet ble tatt i bruk som sprengningsfelt i 1977. Vi har gjort akkumuleringsforsøk med utsatte vannmoser ovenfor sprengningsfeltet (st.1) like nedenfor (st.2) og nedenfor skytebanen (st.3). Hærens Forsyningskommando, Laboratorieavdelingen har undersøkt metallinnhold i vann ved enkelte anledninger samt metallinnhold i jord. I vannprøvene ble det funnet tildels meget høye metallkonsentrasjoner, men dette gjaldt også referanseprøvene utenfor demoleringsfeltet.

Resultater

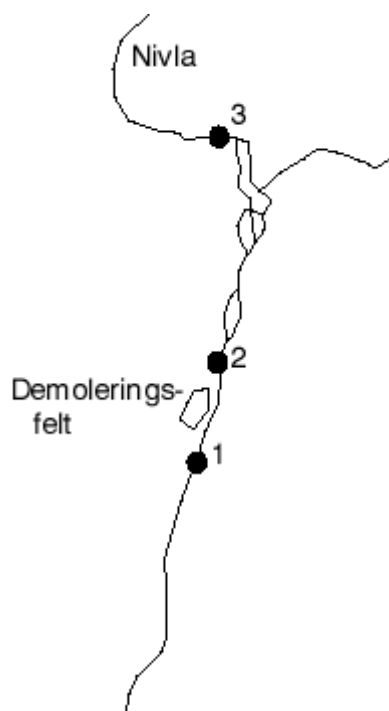
Det var en god sammenheng mellom konsentrasjonene av bly og kobber i mose og vann, selv om konsentrasjonene for bly i vann var meget lave (Fig.11B). Det var følgelig en kraftig oppkonsentrasjon av metaller i mosene i dette feltet, vesentlig på grunn av klart humusfattig vann med nær nøytral reaksjon (Fig.3 og 11C). Dette gjør at små konsentrasjonsendringer i vannfasen vil gi klare utslag i form av konsentrasjonsøkninger i mosene. Denne egenskapen er svært gunstig med hensyn til overvåkingen av metallutlekkningen fra demoleringsfeltet fordi vannføringen i Nivla er relativt høy og fortynningseffekten stor. Konsentrasjonene av både bly og kobber har vært høyere i Nivla etter at den har passert demoleringsfeltet i alle årene overvåkingen har foregått (fra st.1 til 2). Økningene har imidlertid vært beskjedne antagelig på grunn av en god vannføring i Nivla. Øydalselvi, som tilkommer mellom st. 2 og st.3, fortynner konsentrasjonene ytterligere slik at de på st.3 har vært nær de samme som referansen oppstrøms feltet (st.1). Det er imidlertid interessant å merke seg at selv om samløpet med Øydalselvi fører til en reduksjon i konsentrasjonene, så har de ved st.3 i nesten alle år ligget mellom referansen og st.2 etter demoleringsfeltet. Dette er også det en skulle forvente ved en ren fortynningsteori. Det er imidlertid små forskjeller når det gjelder vannkonsentrasjoner, og det er lite sannsynlig at dette kan vises med vannanalyser alene uten en meget omfattende prøvetakning. Resultatene indikerer derfor at metoden er meget følsom i dette vassdraget og svært godt egnet til å oppfylle målsetningen i overvåkingsammenheng. Kobberverdiene var høyere enn normalt, men det var også verdiene på referansestasjonen oppstrøms demoleringsplassen. Det er med andre ord antagelig naturlige, geokjemiske årsaker til dette såfremt ingen demolering eller skyting har foregått lenger opp i dalen i tidligere perioder. Konsentrasjonene var generelt noe høyere i 1995 og 1996 enn de andre årene, men basert på mosedataene har konsentrasjonene av bly og kobber aldri oversteget henholdsvis 1 µg/l og 6 µg/l.

I perioden juni-september 1999 ble 6 vannprøver fra alle stasjonene analysert med hensyn på flere metaller. Det var ingen signifikant forskjell på konsentrasjonene oppstrøms og nedstrøms demoleringsplassen for arsen, krom, kobolt og molybden. For disse elementene var verdiene (µg/l) henholdsvis: < 0,05 (As), < 0,1 (Cr), 0,13 (Co), og 0,30 (Mo). For sink og kadmium ble det registrert en liten konsentrasjonsøkning etter demoleringsplassen fra 4,2 til 6,0 µg/l for sink og fra 0,005 til 0,02 µg/l for Cd. Disse verdiene er noe høyere (nær 75 prosentilen) enn de en oftest finner i norske innsjøer, men må likevel betegnes som uproblematisk.

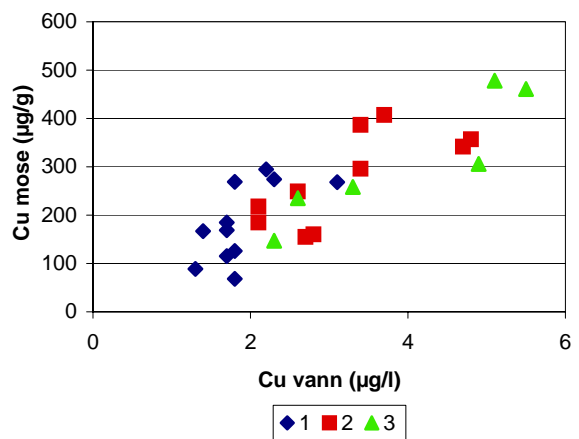
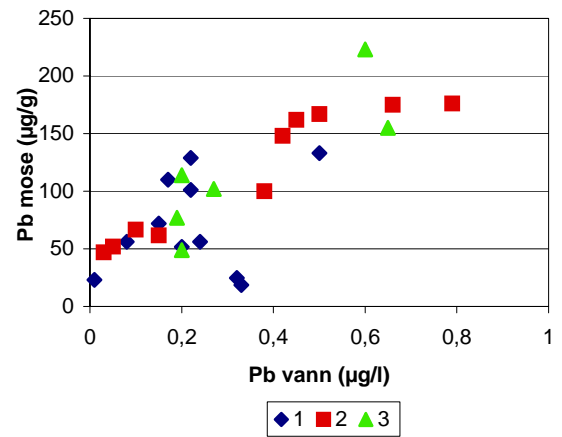
Konklusjon

Vannkvaliteten i Nivla er meget godt egnet til å benytte vannmoser som biomonitorer. Det ble registrert et påslag i konsentrasjonene av bly og kobber i Nivla etter demoleringsfeltet i alle årene som feltet har vært overvåket. Lenger ned i elva fortynnes konsentrasjonene av et betydelig sidevassdrag (Øydalselvi), slik at påslaget i konsentrasjonene ble ubetydelige og nær verdiene på referansestasjonen etter samløpet. Aktiviteten i demoleringsfeltet har derfor ikke bidratt til forhøyde konsentrasjoner av bly og kobber i Lærdalselva. Utlekkingen av metaller fra demoleringsfeltet har ikke vært av en slik størrelse at det har influert nevneverdig på vannkvaliteten i Nivla selv før samløpet med Øydalselvi. Økningen har vært ca. 0,5 µg/l for bly og 2 µg/l for kobber. De tre siste årene har konsentrasjonene vært nær de samme og tilnærmet lik de verdiene som ble observert ved starten av undersøkelsen. Til tross for liten økning i konsentrasjonene på grunn av erosjon i demoleringsfeltet på midten av 1990-tallet så har det vært små variasjoner i konsentrasjonene av bly og kobber i Nivla. Konsentrasjonene av Pb, Cu, Zn og Cd i Nivla etter demoleringsplassen var for alle elementene likevel høyere enn median verdiene (nær 75 prosentilen) for konsentrasjoner observert i norske innsjøer, men forurensningsgraden må karakteriseres som liten.

A



B



C

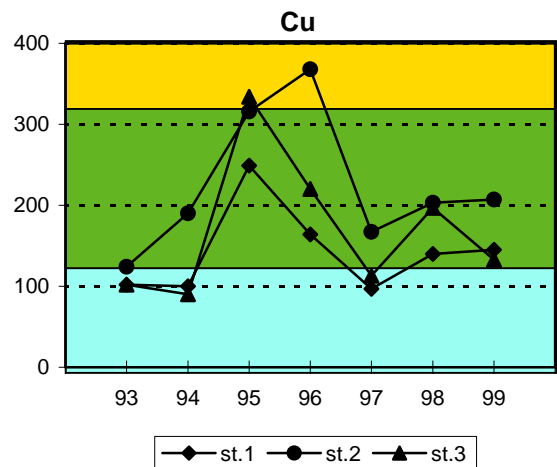
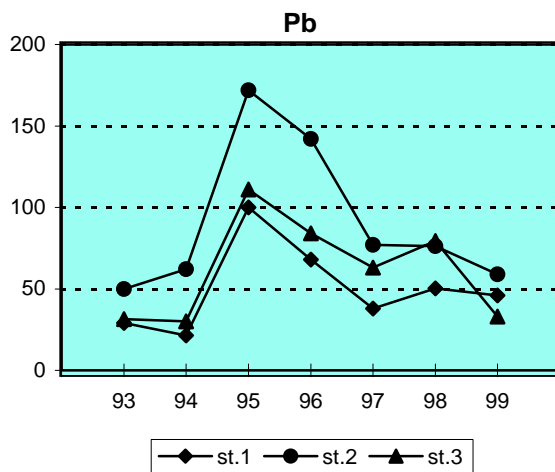


Fig.11. A. Prøvetakningsstasjoner i Lærdal demoleringsfelt. B. Sammenhengen mellom konsentrasjoner av kobber og bly i vann og mose. C. Konsentrasjoner ($\mu\text{g/g}$ tørrvekt) av kobber og bly i mose gitt som årlige aritmetiske middeler for overvåkingsperioden.

Sætermoen

Vannkvaliteten i flere av bekkene på Sætermoen ble overvåket fram til 1993 (Rognerud 1994a), men overvåkingen ble siden lagt ned. Siden 1996 har imidlertid konsentrasjoner av bly og kobber blitt undersøkt i avrenningen fra nedgravd metallskrot (etter ryddinger i skytefeltet) i Kobbryggdalen, samt fra den nyetablerte skytebanen A-11 (st.1 og st. 1 ref.). Siden 1997 har også eventuelle effekter av utlekking av bly og kobber fra militær virksomhet i Liveltskardelvas nedbørfelt (st.3) på vannkvaliteten i Salangselva (st.3 ref.) blitt undersøkt (Fig.12A.). Forurensningsgraden ble vurdert ut fra konsentrasjonsøkningen fra referansestasjonene som lå oppstrøms kildene. Det ble ikke registrert økninger i bly-konsentrasjonene verken fra deponiet eller fra skytebanen, mens en moderat konsentrasjonsøkning ble registrert for kobber i 1996, men ikke i de tre neste årene (Fig. 12C). Dette skyldes antagelig at kobber bindes noe svakere enn bly i kildeområdet. Konsentrasjonene i Salangselva og Liveltskardelva var nær de samme. Vi kan derfor konkludere med at Liveltskardelva ikke bidrar til å forhøye konsentrasjonene av bly og kobber i Salangselva og vannkvaliteten kan karakteriseres som god. Konsentrasjonene av bly var nær de naturgitte, mens kobberverdiene var noe høyere, men likevel nær de naturgitte. Vi kan derfor konkludere med at ingen av de antatte forurensningskildene (den nye skytebanen, skrothaugen eller hele skytefeltet) har hatt nevneverdig innflytelse på konsentrasjonene av bly og kobber ved de stasjonene som har blitt undersøkt.

I 1999 ble det også eksponert vannmoser oppstrøms og nedstrøms feltskytebanen på Karlstadskogen fordelt på 2 eksponeringsperioder. Resultatene er gitt i tabell nedenfor:

| Eksponerings- periode | Cu ($\mu\text{g/g}$ tørrvekt) | | Pb ($\mu\text{g/g}$ tørrvekt) | |
|--------------------------|-----------------------------------|---------|-----------------------------------|---------|
| | Oppstr. | Nedstr. | Oppstr. | Nedstr. |
| Juli-august | 11 | 45 | 1,8 | 209 |
| August-september | 16 | 67 | 2,6 | 335 |

Det var en betydelig konsentrasjonsøkning i bekken for bly, men noe mer moderat for kobber. På bakgrunn av disse målingene og vannkvalitetsmålinger på slutten av 1980-tallet kan vi anslå at konsentrasjonene av bly og kobber i bekken etter feltskytebanen var henholdsvis ca. 10 $\mu\text{g/l}$ og ca. 3 $\mu\text{g/l}$. På bakgrunn av disse stikkprøvene vil vi foreslå at feltskytebanen på Karlstadskogen inkluderes i overvåkingen.

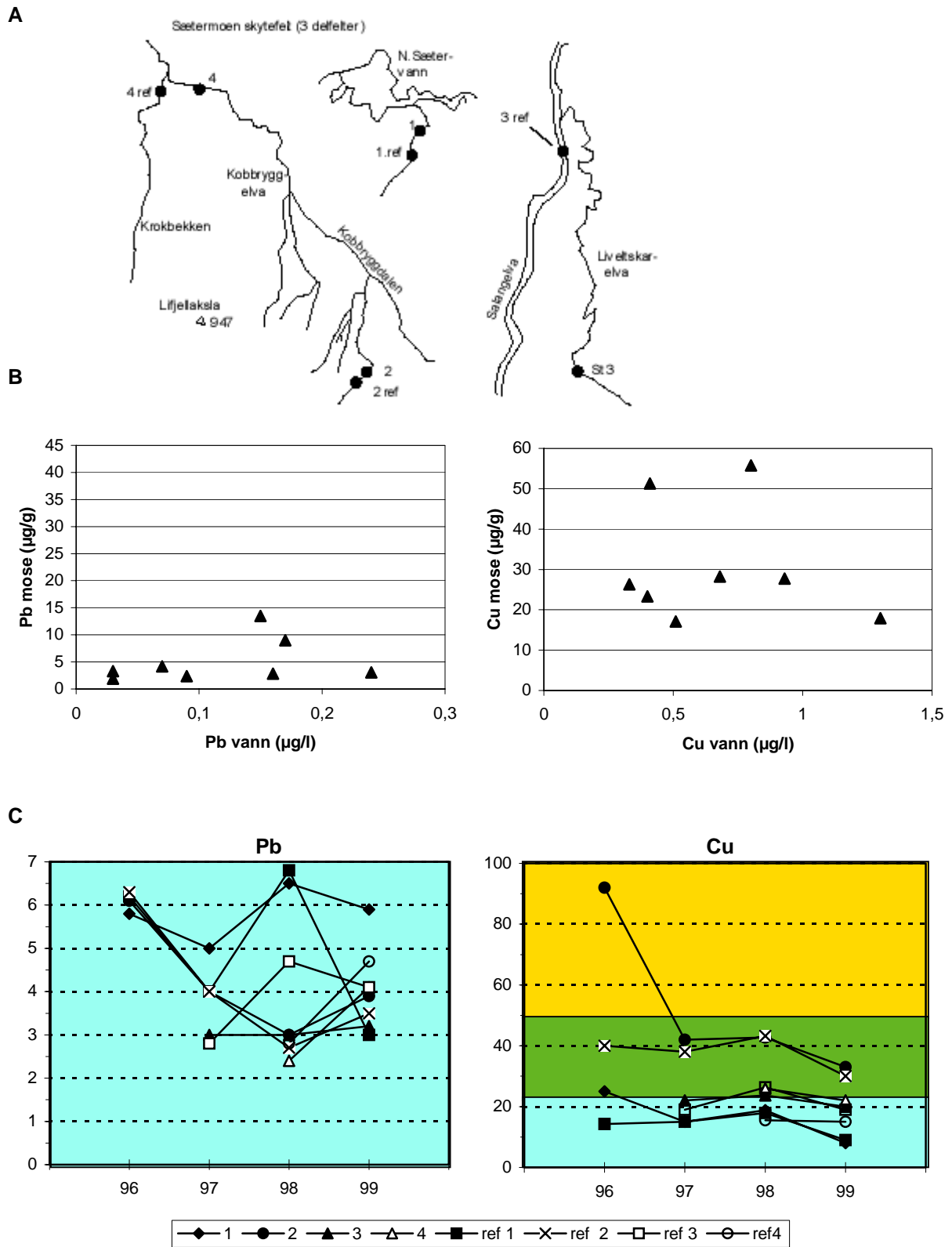


Fig.12. A. Prøvetakningstasjoner i Sætermoen skytefelt. B. Sammenhengen mellom konsentrasjoner av kobber og bly i vann og mose. C. Konsentrasjoner ($\mu\text{g/g}$ tørrvekt) av kobber og bly i mose gitt som årlige aritmetiske middel for overvåkingsperioden.

Ringerike og Rena skyte- og øvningsfelter.

Disse feltene er nylig etablert og målingene tar sikte på å følge med utviklingen i metallkonsentrasjonene i bekkene som avvanner de mest belastede områdene av feltene. På Ringerike innebærer dette målinger i bekken som drenerer kuleinnslaget fra 200 m banene (Fig.13A), mens Ygleklettbekken (drenerer geværskytebanene) og Stormobekken (drenerer kulvertinnslaget for skyting med stridsvogn) måles på Rena (Fig. 13A). Sammenhengen mellom konsentrasjoner av bly og kobber i mose og vann er vist i Fig. 13B. Konsentrasjonene var lave og på nivå med det som tidligere er registrert som bakgrunnsnivå for de respektive feltene. Det var ingen tegn til forurensninger av bly og kobber fra de nyetablerte feltene i 1998 og 1999. Resultatene for 3 til 4 eksponeringsperioder i perioden juni-oktober 1999 er vist i tabellen nedenfor.

| | Ygleklettbekken | middel | Stormobekken | middel | Ringerike | middel |
|-----------|-----------------|--------|-----------------|--------|------------|--------|
| Pb (µg/g) | 9,9-3,7-3,6-14 | 7,8 | 6,2-2,3-3,0-3,8 | 7,2 | 5,0-5,3-19 | 9,7 |
| Cu (µg/g) | 15-6,3-1,6-6,1 | 3,8 | 20-6,1-11-32 | 17,2 | 11-14-19 | 14,7 |

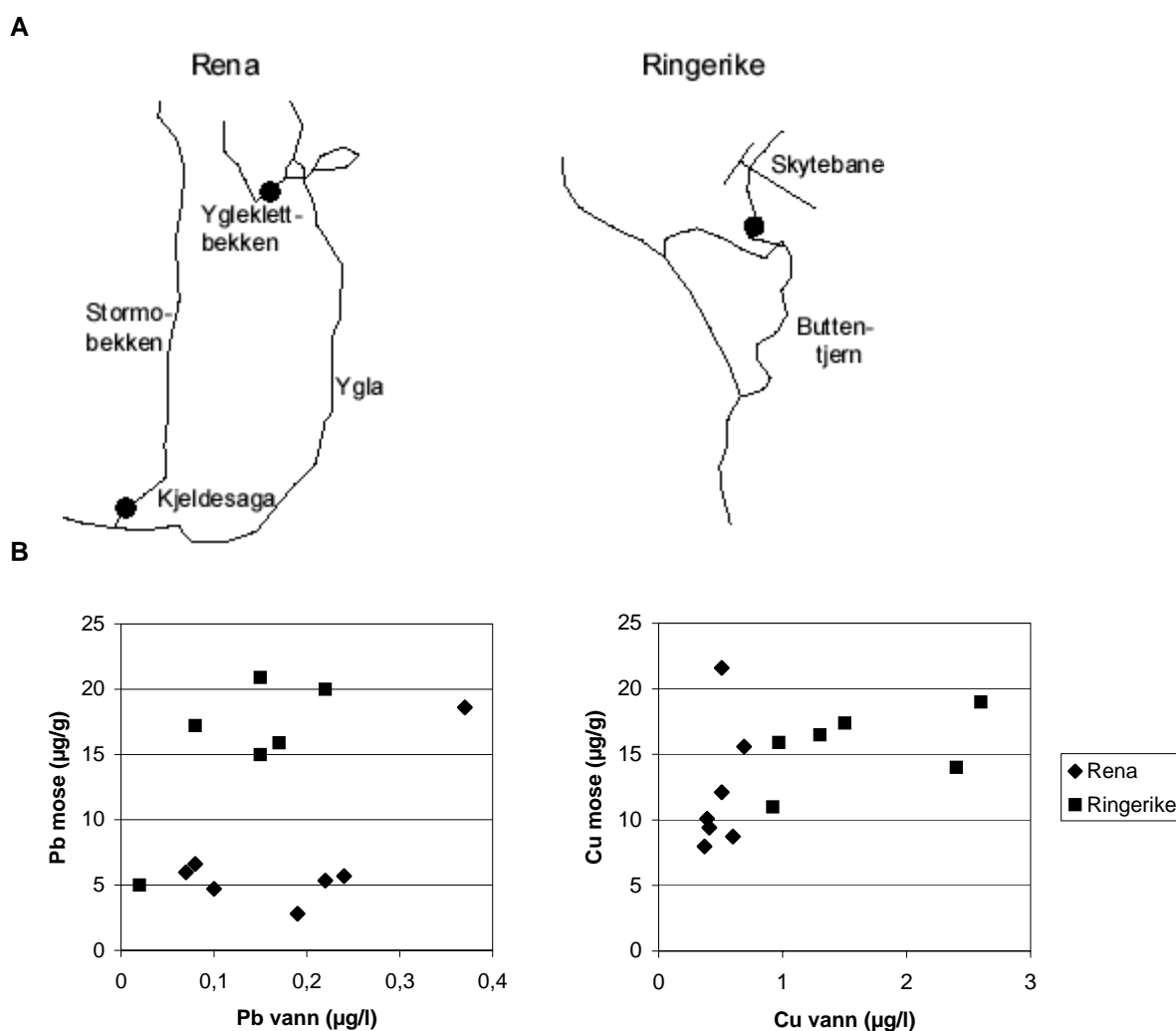


Fig.13. A. Prøvetakningstasjoner i Ringerike og Rena skyte- og øvningsfelter. B. Sammenhengen mellom konsentrasjoner av kobber og bly i vann og mose.

Heistadmoen, Hengsvatn, Mjølfjell og Høybuktknoen

Innledning

Heistadmoen skyte- og øvningsfelt ble anskaffet av Forsvaret da leiren ble etablert i 1909. Feltet er på 7000 mål. Skytefeltet på Hengsvatn ble leiet av Sjølvverkets skoger for å øve med tyngre våpen, bombekastere og langtrekkende panservåpen. I 1985 ble dette feltet utvidet til sin nåværende størrelse 34000 mål. Heistadmoen dekker i dag behov for grunnleggende geværskyting og de innledende feltmessige øvinger. Hengsvatn dekker behov for videregående utdanning først og fremst for tyngre våpen. I tillegg nyttes feltet under repetisjonsøvelser og som et suppleringsfelt for den mere grunnleggende utdannelsen.

Mjølfjell skytefelt ble anlagt på slutten av 1950-tallet og har blitt utvidet i flere etapper opp gjennom årene. Feltet, som leies av private grunneiere, er på i alt 126 km². Både Hæren, Sjøforsvaret, Luftforsvaret og Heimevernet bruker feltet, og det benyttes som øvingsområde for såvel nasjonale som allierte avdelinger. Området ligger i Voss kommune og dreneres av Rjoåni som er sidevassdrag til Raundalselvi. Det skytes med de fleste infanteri- og artillerivåpentyper inklusive trådstyrte raketter mot bevegelige luftmål. Store deler av feltet ligger over skoggrensa med topper opp mot 1300 moh., men mesteparten skytingen med handvåpen er konsentrert til de sentrale delene av Rjoanddalen som ligger i bjørkebeltet ca. 750-800 moh. Noe handvåpenskyting foregår imidlertid også i sidedalene Grodjuvet og Såtedalen. I Grodjuvet gjennomføres dessuten sprengningskurs for Luftforsvaret, mens det i Såtedalen hovedsakelig foregår skyting med bombekaster. Feltet ble befart i slutten av august 1999 - ved lav vannføring - og det ble samtidig samlet inn vannprøver og utplassert moser på i alt 5 stasjoner. Moseprøver og vannprøver ble videre innsamlet den 1. oktober.

Høybuktknoen var bygget opp av tyske okkupasjonsstyrker som et tungt baseområde for deres angrep mot Murmansk. Området ble fullstendig ødelagt ved tilbaketrekkingen i 1944. Etablisementet for Garnisonen i Sør-Varanger (GSV) ble etablert i første byggefase 1950-56, men er senere bygget ut i etapper fram til nåværende status. I dag omfatter skytefeltene i alt 12500 da og er delt i et østre og et vestre felt. Det arbeides for tiden med å flytte skytebanene i det østre feltet til Dallasjavri's nedbørfelt øst for de nåværende baner. GSV utgjør idag en redusert infanteribataljon med et grensekompani forlagt langs den felles Norsk-Russiske grense. En skisse over disse 4 skytefeltene med stasjonslokalisering er vist i Fig.14

Resultater og konklusjon

De viktigste forholdene i vann som påvirker metallers tilstandsform og mobilitet er pH og konsentrasjonen av humus. På bakgrunn av Fig.3 kan vi fastslå følgende: Stasjonene på Mjølfjell hadde svært lav farge og svakt sur reaksjon. Lav farge og svakt sur reaksjon var også situasjonen for det vestre skytefeltet (Pumpusbekken) på Høybuktknoen, mens det østre feltet hadde brunt vann med svak sur reaksjon (drenerer myrområder). Bekkene på Heistadmoen og Hengsvatn hadde nær nøytralt pH og middels brunfarget vann.

Konsentrasjonene av bly og kobber i mose og vann er vist i Fig. 15 og de enkelte målingene i Tabell 4. Det var en svært god sammenheng mellom konsentrasjonene av bly og kobber i vann og mose for stasjonene i Mjølfjell skytefelt. Klart og nær nøytralt vann er hovedårsaken til dette. Konsentrasjonene var høyest på stasjon 5, men var innenfor 95 prosentilen av det som observeres i norske innsjøer. Vannkvaliteten må generelt betegnes som god på de stasjoner som er undersøkt på Mjølfjell.

Det var også en god sammenheng mellom konsentrasjonene av bly og kobber i Høybuktknoens (GSV) østre felt, Hengsvatn og Heistadmoen selv om to observasjoner i den sistnevnte feltet ikke var representative (høye blyverdier i vann lave i mose) fordi bekken i perioder var gått tørr. Bekken som avvanner Høybuktknoens vestre felt (GSV-P) hadde lave blyverdier, men forhøyede kobberverdier antagelig mest på grunn av luftutslipp fra russiske smelteverk. Generelt var konsentrasjonene av bly og kobber i Høybuktknoens Østre felt, Hengsvatn og Heistadmoen høyere enn de en finner i norske innsjøer. Vannkvaliteten kan karakteriseres som mindre god til nokså dårlig.

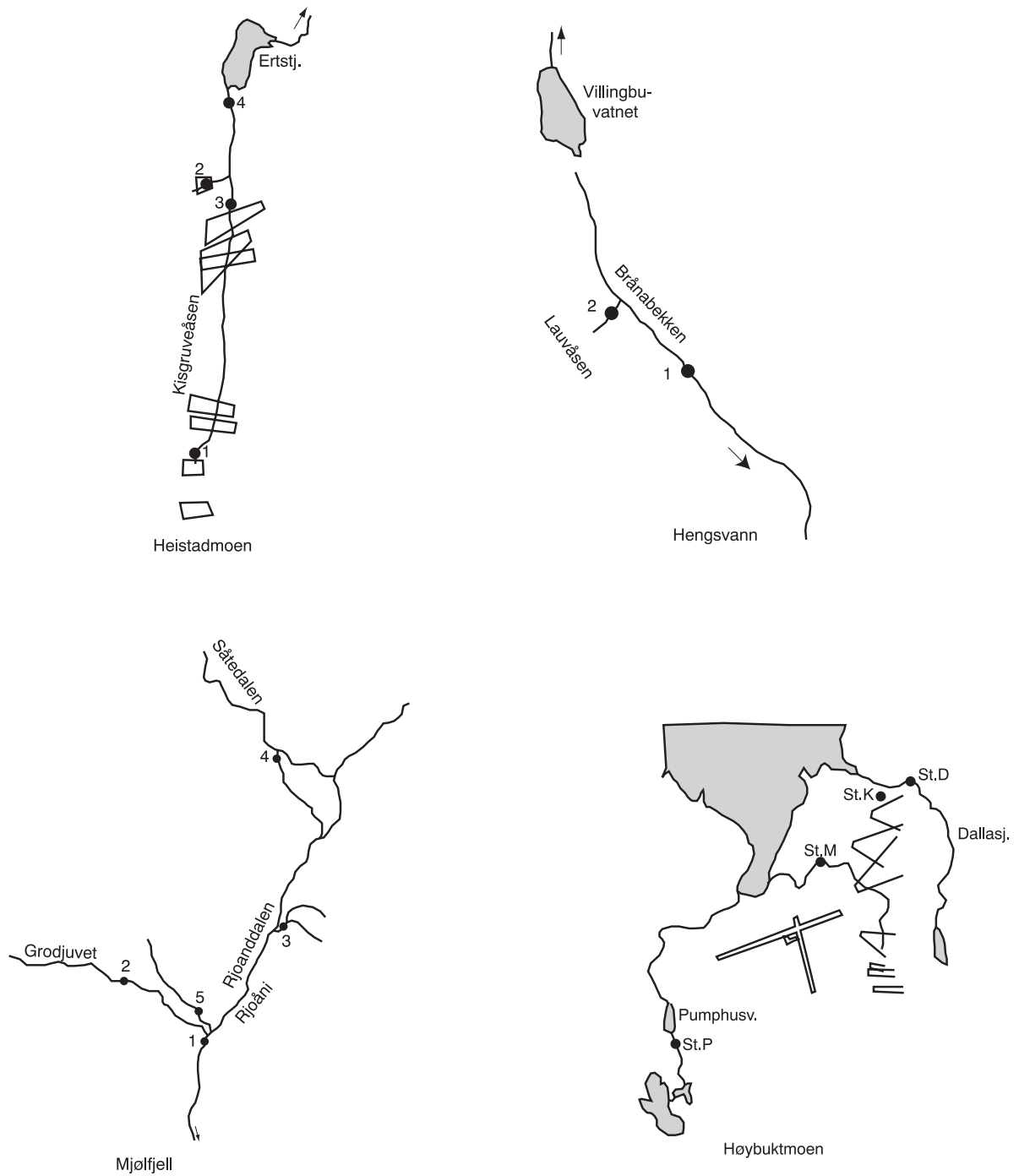


Fig.14.Prøvetakningstasjonene i Mjølfjell skytefelt, Heistadmoen, Hengsvann og Høybukta (GSV)

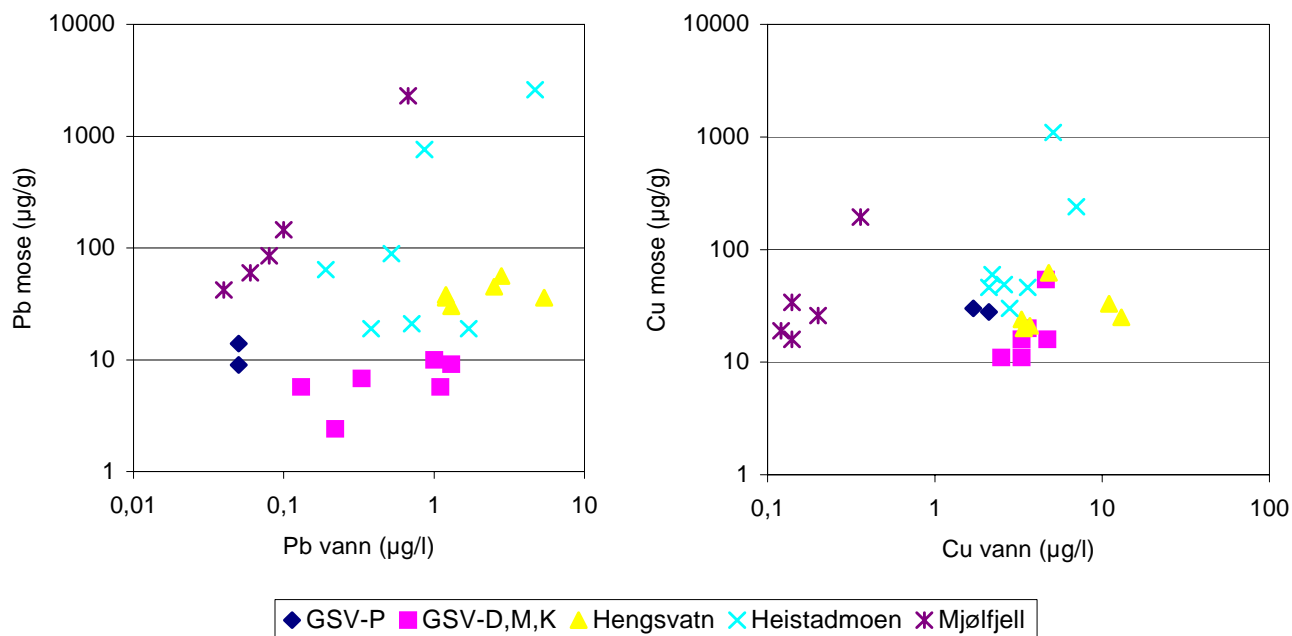


Fig. 15. Sammenhengen mellom konsentrasjonene av bly og kobber i vann og mose. Stasjonskoder på Høybuktknoen (GSV) er gitt i Fig. 14.

Tabell 4. Konsentrasjoner av bly og kobber i mose og vann ved ulike stasjoner for de 4 nevnte skytefeltene i 1999. For stasjonslokalisering se fig.14.

| Lokalitet | Stasjon | Pb-vann, µg/l | Pb-mose, µg/g | Cu-vann, µg/l | Cu-mose, µg/g |
|--------------------|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Høybuktknoen (GSV) | D | 0,22 | 2,4 | 3,3 | 11 |
| Høybuktknoen (GSV) | D | 0,13 | 5,7 | 3,3 | 16 |
| Høybuktknoen (GSV) | P | 0,05 | 9 | 1,7 | 30 |
| Høybuktknoen (GSV) | P | 0,05 | 14 | 2,1 | 28 |
| Høybuktknoen (GSV) | K | 1,3 | 9,1 | 4,6 | 54 |
| Høybuktknoen (GSV) | K | 0,33 | 6,8 | 2,5 | 11 |
| Høybuktknoen (GSV) | M | 1 | 10 | 3,6 | 20 |
| Høybuktknoen (GSV) | M | 1,1 | 5,7 | 4,7 | 16 |
| Hengsvatn | 1 | 1,2 | 36 | 3,4 | 20 |
| Hengsvatn | 1 | 2,5 | 45 | 13 | 25 |
| Hengsvatn | 1 | 5,4 | 36 | 3,7 | 21 |
| Hengsvatn | 2 | 1,3 | 30 | 3,3 | 24 |
| Hengsvatn | 2 | 1,2 | 38 | 4,8 | 62 |
| Hengsvatn | 2 | 2,8 | 56 | 11 | 33 |
| Heistadmoen | 1 | 4,7 | 2600 | 7 | 240 |
| Heistadmoen | 2 | 0,86 | 760 | 5,1 | 1100 |
| Heistadmoen | 2 | 0,52 | 89 | 2,2 | 60 |
| Heistadmoen | 2 | 0,19 | 64 | 2,1 | 46 |
| Heistadmoen | 4 | 0,38 | 19 | 3,6 | 46 |
| Heistadmoen | 4 | 1,7 | 19 | 2,6 | 49 |
| Heistadmoen | 4 | 0,71 | 21 | 2,8 | 30 |
| Mjølfjell | 1 | 0,06 | 60 | 0,2 | 26 |
| Mjølfjell | 2 | 0,1 | 145 | 0,14 | 34 |
| Mjølfjell | 3 | 0,04 | 42 | 0,14 | 16 |
| Mjølfjell | 4 | 0,67 | 2300 | 0,36 | 194 |
| Mjølfjell | 5 | 0,08 | 85 | 0,12 | 19 |

Sammenfattende diskusjon

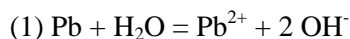
Overvåkingen omfatter en kartlegging av forurensningsgraden med hensyn til bly og kobber i bekker som avvanner Forsvarets viktigste skyte- og øvningsfelter, et demoleringsfelt, et testfelt og noen skrotdeponier. Metoden som er brukt baserer seg på anvendelse av vannmoser fra slekten *Fontinalis* som biomonitor. Undersøkelser som er gjennomført, særlig i 1998, har vist at det generelt sett var gode sammenhenger mellom konsentrasjoner av bly og kobber i vann og moser, men at opptakseffektiviteten var lavere når vannet inneholdt mye humusstoffer. Dette skyldes at mosene ikke tar opp metaller som er kompleksbundet til humuspartikler. Således gir mosene oss informasjon om den biotilgjengelige delen av totalkonsentrasjonen i vann. Dette er viktig når toksiske effekter på akvatiske organismer diskuteres. Overvåkingen har også vist at i felter med humusfattig vann med nær nøytral reaksjon, er opptaket av metaller i mosene så effektiv at svært små endringer i konsentrasjonene kan måles med stor grad av sikkerhet. Dette hadde ikke vært umulig ved bruk av vannanalyser uten meget hyppige prøveuttak og et tilsvarende dyrt analyseprogram. Dette illustrerer styrken slike biomonitorer har i overvåkningsprogrammer.

Kontamineringsfaren ved bruk av biomonitorer er liten. Dette gjør at Forsvarets egne folk har kunnet delta i prøveinnsamlingen etter nødvendig instruksjon. Opplegget med slike lokale prøvetakere har fungert svært tilfredsstillende. På denne måten har det også vært mulig å gjennomføre et relativt omfattende, kostnadseffektivt og langsiktig overvåkningsprogram som har gitt nyttig informasjon om utvikling i tid når det gjelder forurensningsgraden av bly og kobber i bekker fra de ulike skytefeltene.

I 1999 har vi også målt konsentrasjonene av ca. 50 metaller i totalt 64 vannprøver fordelt på de ulike feltene. Av de undersøkte metallene var det foruten bly og kobber særlig antimon, sink og barium som forekom i høyere konsentrasjoner i skytefeltene enn i norske innsjøer. Dette synes rimelig da prosjektilene fra handvåpen blant annet også inneholder sink og antimon.

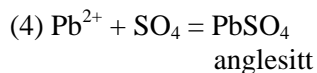
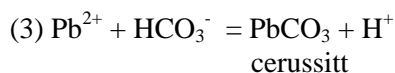
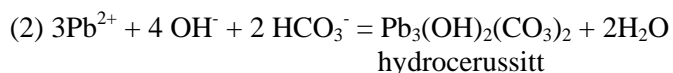
Forurensningsgraden var svært forskjellig i de ulike feltene, og det er flere årsaker til dette. De viktigste er imidlertid brukerfrekvensen av banene, fysiske inngrep i deponiene som graving og sporsetting, og de naturgitte forhold. Skytefeltene på Steinsjøen og Evjemoen har svært høye blyverdier i bekkene, spesielt i de som avvanner feltskytebanene. De andre feltene hadde ikke store forurensningsproblemer, med unntak av enkelte tilfeller ved bruk av selvanvisere (fragmenterer prosjektilene) i nær tilknytning til vann. Vannkvaliteten i de to navngitte feltene må karakteriseres som meget dårlig. Det har også vært en klar tendens til økende konsentrasjoner i overvåkningsperioden for Steinsjøfeltet og Evjemoen skytefelt fram til 1996. Siden har det skjedd små endringer, med unntak av kobberkonsentrasjonen på Evjemoen som generelt har sunket. I de andre feltene har det generelt sett ikke vært noen klar negativ utvikling, men mer en tilstand av stabilitet. Likevel har det i enkelte tilfeller skjedd utslipp eller aktiviteter som har økt utløsningen av metaller, men årsakene har oftest vært klarlagt, og tiltak har blitt gjort der dette var mulig. Således har overvåkingen oppfylt sin hovedhensikt, dvs å følge tidstrenden i metallkonsentrasjonene og gjøre tiltak så snart som mulig der dette har vært nødvendig. Alle tiltak har imidlertid ikke vært effektive; f.eks fungerte ikke kalksperringen på feltskytebanen i Larsmyrdalen i Steinsjøfeltet, og på Evjemoen er ingen tiltak gjennomført. På Steinsjøen ble nærstridsmålet på den nederste feltskytebanen kalket på våren i fjord. Dette ga ingen umiddelbar effekt i fjor sommer, men overvåkingen vil ventelig avdekke effektene av dette på sikt. På Evjemoen er det såvidt vi vet ikke planlagt tiltak.

Vi skal se litt nærmere på hva som skjer med prosjektilene etter at de er deponert i skytefeltet, og om hva som er årsakene til de forskjellene vi har observert mellom feltene. De største betenkelighetene med hensyn til forurensning er knyttet til bly, og vi skal konsentrere utredningen om dette elementet. Etter at prosjektilet er deponert i jordsmonnet, i mer eller mindre deformert tilstand, vil blottlagte flater av elementært bly utsettes for korrosjon (oksidasjon). Dersom dette skjer i et jordsmonn uten nærvær av sterke syrer, vil vi ha følgende reaksjon:



Det dannes med andre ord frie blyioner som er den giftige formen av bly i de fleste sammenhenger. De frie blyionenes videre skjebne er i høyeste grad avhengig av jordas surhetsgrad og mulige kompleksdannere. I et nøytralt til basisk miljø dannes det en såkalt crust eller et belegg av blysalter på

korrosjonsflatene. De vanligste crustdannelsene består av blykarbonater som hydrocerussitt og cerussitt eller blyulfat som kalles anglesitt (likning 2-4):



Av disse ser vi at anglesitt-dannelsen er uavhengig av pH i markvannet, mens dannelsen av de andre saltene er pH-avhengig. Dannelsen av disse saltene i et god bufret jordsmonn (nøytral til basisk pH) gjør at det dannes et beskyttende lag av salter som hindrer en videre korrosjon av prosjektilene. Dette er en av årsakene til at blyutlekkingen i enkelte skytefelt med et godt bufret jordsmonn er relativt beskjeden. Dette er i hovedsak situasjonen i de nord-norske feltene Sætermoen, Mauken og Porsangmoen. Dersom jordsmonnet har lite kalsium og inneholder lite eller ubetydelige mengder bikarbonat (HCO_3^-), vil cerussitt eller hydrocerussitt dannes i ubetydelige mengder eller løses i perioder når vannet er tilstrekkelig surt. Da vil de frie blyionene i liten utstrekning danne salter (muligheter for anglesitt), men i hovedsak bindes til humus, jernoksider eller leireminerale. Humus brytes ned til humussyrer og humuskolloider som kan ta opp løst bly og transporterer dette ut fra deponiet med markvannet. Vi sier at blyet mobiliseres, og denne transporten bort fra prosjektilet er med på å øke korrosjonshastigheten. Det er derfor deponiene i sure, humusrike områder som eksempelvis myrer kan gi stor utlekking av metaller. Dersom disse stedene i tillegg utsettes for graving eller sporsetting (forårsaket av kjøretøyer), vil gjennomtransporten av vann øke betydelig sammen med sannsynligheten for erosjon av blyholdige organiske partikler. Dette har i hovedsak vært situasjonen i Steinsjøfeltet og i Evjemoen skytefelt, men også tilfeldige steder i andre skytefelt. Dersom området har lave humuskonsentrasjoner slik som tilfellet oftest er på avsetninger av sand og silt (moer), vil bindingsgraden være avhengig av mengden jern- og aluminium-oksider i jorda. Generelt sett bindes imidlertid løste blyioner godt på slike moer hvor det er rikelig med avsetninger av finkorna partikler med jernoksider på overflaten. Det er derfor blykonsentrasjonene er lave i grunnvannet på Terningmoen og på Sessvollmoen. Vi kan konkludere med at hovedproblemet knyttet til blyavrenning fra skytefelt vil vi finne i områder med dårlig bufret jordsmonn, mye humus og surt vann. Den negative utviklingen mot økende konsentrasjoner i Steinsjøfeltet og i skytefeltet på Evjemoen fram til 1996 skyldes en kombinasjon av økende belastning, graving i deponiene og muligens atmosfæriske avsetninger av syrer.

De enkleste og mest effektive tiltakene som kan gjøres i deponier i de mest utsatte skytefeltene, er kalking og å hindre graving, sporsetting og andre aktiviteter som mobiliserer bly-humusforbindelsene. Det er sannsynligvis ikke nok å lage såkalte kalksperrer, da vannet erfaringsmessig lett tar vegen over sperren. Hele deponiet bør kalkes slik at en får et mer basisk miljø i deponiet. Dette vil være et godt tiltak som kan stoppe en eventuell negativ utvikling og sørge for at blyet i hovedsak forblir på deponeringsplassen.

Et viktig forhold som er aktualisert i den senere tid, er at Forsvaret i økende grad skal avhende grunn som tidligere er brukt som skytefelt eller deponi av militært utstyr. I denne sammenheng er det viktig at forurensninger ikke spres over større områder enn nødvendig, slik at eventuelle oppryddinger begrenses i omfang. Det kan derfor være av stor nytteverdi for Forsvaret å iverksette tiltak for å hindre uttransport og spredning av bly og kobber. Dette gjelder spesielt feltskytebaner som er mye brukt, og et nødvendig ledd i utdannelsen av soldater, men der det i liten utstrekning er mulig å samle opp prosjektilene.

Litteraturliste

- Barryman, D. 1990. Selection de nouveaux indicateurs de la qualite des cours d'eau du Quebec. Ministry of Environment Quebec EN 900 140 QE/67/1, 77 p.
- Bengtsson, Å & Lithner, G. 1981. Vattenmossa (*Fontinalis*) som mätare på metallförorening. Statens Naturvårdsverk, PM 1391.
- Descay, J. P. & Empain, A. 1981. Inventaire de la qualite des eaux courantes en Wallonie. Univ. of Liege, Department of Botany.
- Frost, U. 1990. Transplantationversuche mit Wassermossen zur Indication der Gewässergüte am Niederrhein. *Cryptogamie, Bryol. Lichenol.* 11. 339-352.
- Holtan, H. & Rosland D.S. 1992. Klassifisering av miljøkvalitet i ferskvann. SFT-veileder nr. 92:06. SFT-TA-905/1992.
- Johansson, L. 1995. Application of aquatic mosses as monitors of heavy metal pollution. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden. 71 pp.
- Kelly, M. G., Gipton, C. & Whitton B. A. 1987. Use of moss-bags for monitoring heavy metals in rivers. *Water Resource* Vol. 21, No. 11, 1429-1435.
- Kjellberg, G. 1991. Tiltaksorientert overvåkning av øvre del av Glåma i 1990. NIVA-rapport L.nr. 2644.
- Kjellberg, G. 1994. Biologisk befaringsundersøkelse av Hunnselva i 1993. NIVA-rapport L.nr. 3050.
- Kjellberg, G. 1994. Tiltaksorientert overvåkning av Trysilelva. Generell vurdering av forurensningsgrad basert på kjemiske og biologiske forhold 1992. NIVA-rapport L.nr. 2983.
- Kjellberg, G. 1988. Vannforurensing fra skytefelt. Delprosjekt 1. Forprosjekt vedrørende eventuelle vannforurensing fra demolering av ammunisjon ved Hjerkinnskytefelt 1986-87. NIVA-rapport L.nr. 2183. 36s.
- Kjellberg, G & Boye, B. 1992. Vannforurensing fra skytefelt. Delprosjekt 2. Forurensningsgrad av tungmetaller fra Terningmoen skytefelt vurdert ut fra ulike målemetoder. NIVA-rapport. L.nr. 2700.
- Kjellberg, G. & Rognerud, S. 1992. Vannkvalitet og forurensningsgrad i bekker som avvanner Bradalsmyra skytefelt. NIVA-rapport L.nr. 2782.
- Klein, B., Meier P.F., & Aubert J-D. 1991. A comparison of aquatic mosses, sediments and water as indicators of metallic pollution: the case of the Venoge river, Switzerland. *J. Trace and Microprobe Techniques*, 9 (2&3), 107-125.
- Lingsten, L. 1991. Levels of heavy metals in aquatic mosses in acidified waterbodies. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 24: 225-230.
- Lithner, G. 1989. Bedömningsgrunder för sjöar och vattendrag. Bakgrundsdocument 2. Metaller. Naturvårdsverket. Rapport nr. 3628. 80s.
- Lopez, J., & Carballeira, A. 1990. A comparative study of pigment contents and responses to stress in five species of aquatic bryophyte. *Lindbergia* 15: 188-193.
- Lopez, J., Vasquez, M.D. & Carballeira, A. 1994. Stress responses and metal exchange kinetics following transplant of the aquatic moss *Fontinalis antipyretica*. *Freshwater Biology* 32: 185-198.

- Monteiro, H.M.V., Goncalves, E. P. & Boaventura, R. 1989. International Symposium on Integrated Approches to Water Pollution Problems, SISSIPA, Lisboa Portugal 19-23 juni 1983,III: 463
- Mouvet, C., Morhain, E. Sutter,C. & Couturieux, N. 1993. Aquatic mosses for the detection and follow-up of accidental discharges in surface waters. *Water Air Soil Pollut.* 66: 333-348.
- Rasmussen, G. & Andersen, S. 1999. Episodic release of arsenic, copper and chromium from a wood preservation site monitored by transplanted aquatic moss. *Water Air, and Soil Pollut.* 109: 41-52.
- Rognerud, S. 1993. Vannforurensning fra skytefelt. Overvåkning av kobber og bly i 1992. NIVA-rapport L.nr. 2884.
- Rognerud, S. 1994a. Overvåkning av metallforurensning fra militære skytefelt og demoleringsplasser. Resultater fra 3-års overvåkning. NIVA-rapport L.nr. 3076.
- Rognerud, S. 1994b. Basisundersøkelse av vannkvaliteten på Rødsmoen i 1993. NIVA rapport. L.nr. 3021. 21s.
- Rognerud, S. 1995. Overvåkning av metallforurensning fra militære skytefelt og demoleringsplasser. Resultater fra 4-års overvåkning. NIVA-rapport. L.nr. 3241.
- Rognerud, S. 1996. Overvåkning av metallforurensning fra militære skytefelt og demoleringsplasser. Resultater fra 5-års overvåkning. NIVA-rapport Lnr. 3416-96.
- Rognerud, S. 1997. Overvåkning av metallforurensning fra militære skytefelt og demoleringsplasser. Resultater fra 6 års overvåkning. NIVA-rapport L.nr. 3669-97
- Rognerud, S. 1998. Overvåkning av metallforurensning fra militære skytefelt og demoleringsplasser. Resultater fra 7 års overvåkning. NIVA-rapport L.nr. 3802-98
- Rognerud, S. 1999. Overvåkning av metallforurensning fra militære skytefelt og demoleringsplasser. Resultater fra 8-års overvåkning. NIVA-rapport L.nr. 4044-99
- Rognerud, S., Kjellberg, G. & Boye, B. 1991. Vannforurensning fra skytefelt. Delprosjekt 1. Generell vurdering av bevegelighet og giftighet av tungmetaller som deponeres i militære skytefelt. NIVA-rapport. L.nr. 2668.
- Rognerud, S. & Boye, B. 1992. Vannforurensning fra skytefelt. Del 3. Forurensning av aktuelle tungmetaller fra 10 av Forsvarets skytefelt. NIVA-rapport. L.nr. 2699.
- Rognerud, S., Kjellberg, G. & Boye, B. 1992. Water pollution of heavy metals from military firing ranges in Norway. Manuscript prepared to the Conference on Environmentally Sound Life
- Rognerud, S. Kjellberg, G. & Ingebrigtsen, K. 1993. Overvåkning av tungmetaller og klorerte hydrokarboner fra Terningmoen skytefelt i 1992, inklusive to eldre søppelplasser. NIVA-rapport L.nr. 2882.
- Say, P.J., & Whitton B.A. 1983. Accumulation of heavy metals by aquatic mosses. 1: *Fontinalis antipyretica* Hedw. *Hydrobiologia* 100: 261-284.
- Selinus, O. 1988. Geochemistry and health. In: Science Reviews Limited. Edited by Ian Thornton, Northwood, U.K. pp 13-19.
- Skjelkvåle, B.L., Mannio,J., Wilander, A., Johansson, K., Jensen, J.P., Moiseenko, T., Fjeld,E., Andersen,T., Vuorenmaa, J. and Røyseth, O. 1999. Heavy metal surveys in Nordic lakes; harmonised data for regional assessment of critical limits. NIVA-report 4039-99.

Skjelkvåle, B.L., Henriksen, A., Vadset, M., og Røyseth, O. 1996. Sporelementer i norske innsjøer- Foreløpig resultat for 473 sjøer. NIVA-rapport L.nr. 3457-96.

Smith, S.C. 1986. Base metals and mercury in bryophytes and stream sediments from a geological reconnaissance survey of Chandalar Quadrangle, Alaska. *Journal of Geochemical Exploration* 25. 345-365.