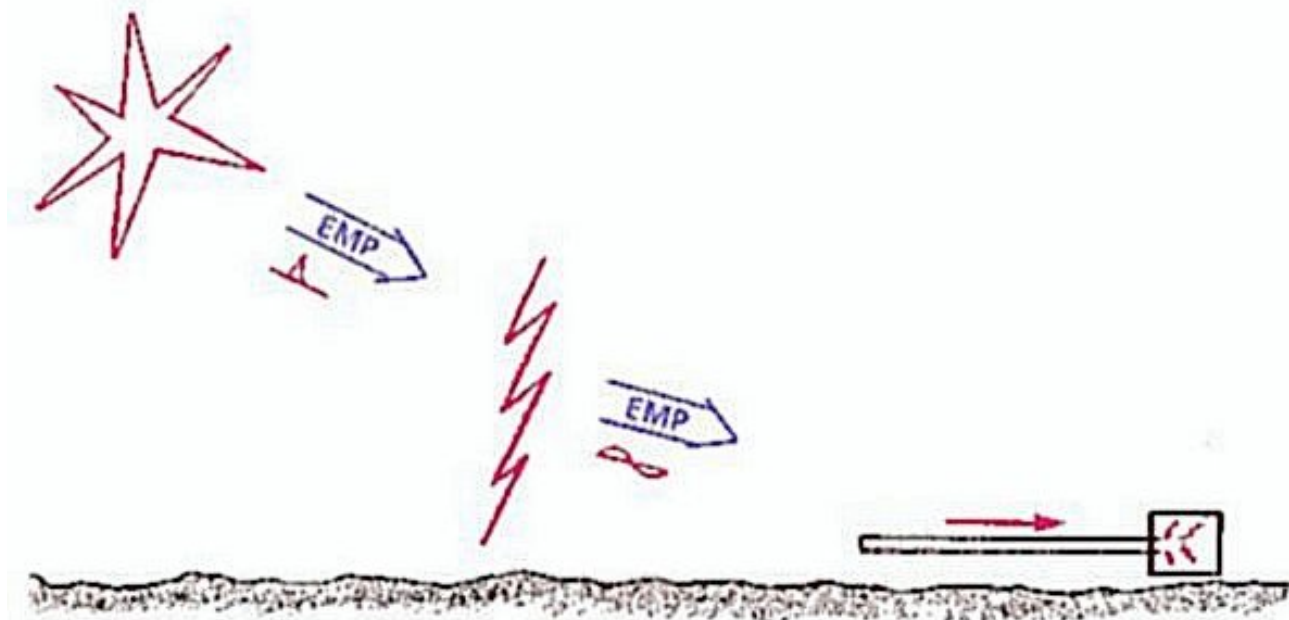


ELEKTROMAGNETISK PULSFORMET STRÅLING FRA LYN OG EKSPLOSJONER

Elektromagnetisk puls (EMP) er en kortvarig og intens radiobølge. EMP oppstår ved lynutladninger, eksplosjon av kjernevåpen og konvensjonelle sprengninger. EMP fra kjernevåpen ble oppdaget av USA under de første våpenprøvene ved at målinger ble forstyrret og instrumenter ødelagt. Det ble snart klart at denne EMP kunne gi alvorlige skader på elektrisk utstyr selv på store avstander fra eksplosjonsstedet (1). EMP fra lynutladninger vil være kjent for de fleste på grunn av den spraking som kan opptre i radioapparater i flere miles avstand. EMP fra kjerneekspløsjoner har gitt spraking i radioer i avstander på 6000 km, og har vært målt etter fem omløp rundt jorden. Ofte benyttes betegnelsene LEMP (Lyn-EMP) og NEMP (Nuclear EMP) om EMP fra kjerneekspløsjoner.



Elektromagnetisk stråling fra lyn og atomsprengninger induserer strømmer i kabler som trenger inn i utstyr og skader dette ved gnistoverslag. Slår lynet direkte ned i kabler blir det enda større skader.

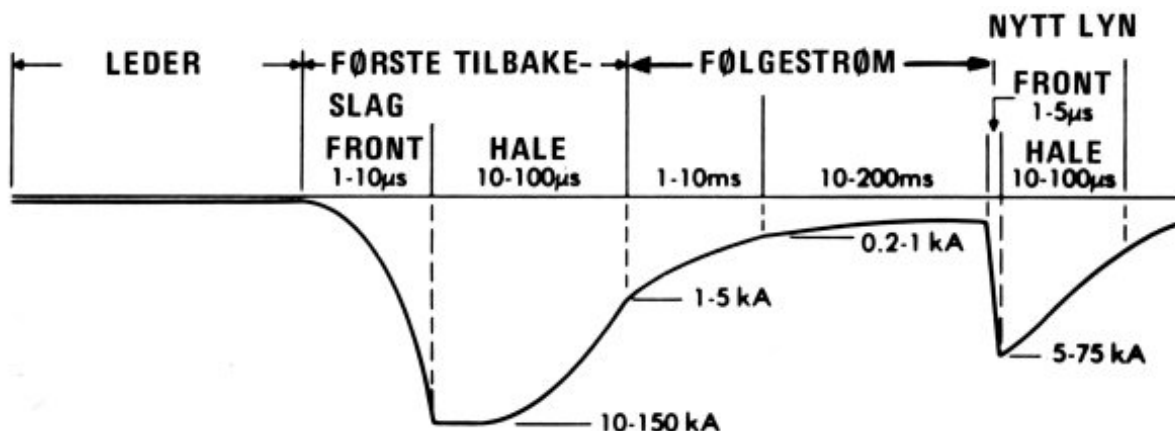
EMP FRA LYNUTLADNINGER



I lyn kan det opptre strømstyrker på opptil 200 kA og lynets lengde kan bli flere kilometer. Den totale elektriske energi i en utladning kan være opp til 200 kWh. Utstrålt EMP fra en slik strømudladning kan derfor få en betraktelig styrke. De fleste lyn starter i en negativt ladet sky med et lederlyn ("leader") som forgrener seg nedover mot bakken. Hastigheten er forholdsvis lav, bare ca 0,05% av lysets hastighet (c). Når en gren av lederlynet får forbindelse med bakken, går det en intens strøm (første tilbakeslag, "nedslag") oppover i grenene som er blitt elektrisk-ledende (ionisert). Hastigheten av strømmen er nå ca 1/3 c. Slike lyn betegnes lyn med negativ polaritet. Lyn kan også starte i høye bygninger, tårn eller antenner og bevege seg oppover mot skyen. Slike lyn betegnes

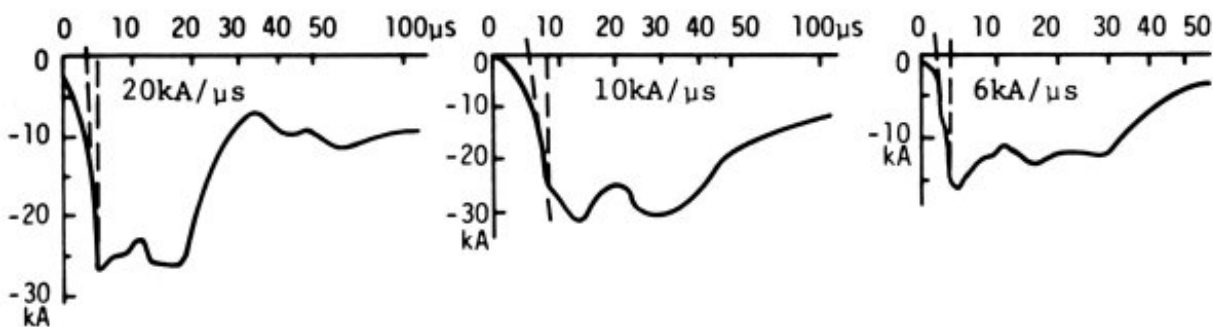
som positive og har vanligvis ikke noe tilbakeslag.

Lyn mellom elektriske ladninger i en sky ("intra-cloud") forekommer ofte. Disse lyn gir vanligvis EMP av mindre styrke enn negative lyn. Et generalisert forløp av strømmen i negative lyn er vist i figuren. Etter første tilbakeslag ("return stroke") kan det opptre flere etterfølgende tilbakeslag på samme sted (maksimalt 10-15).



Forenklet forløp av lynstrømmen som funksjon av tid ved negative lyn fra sky til bakke

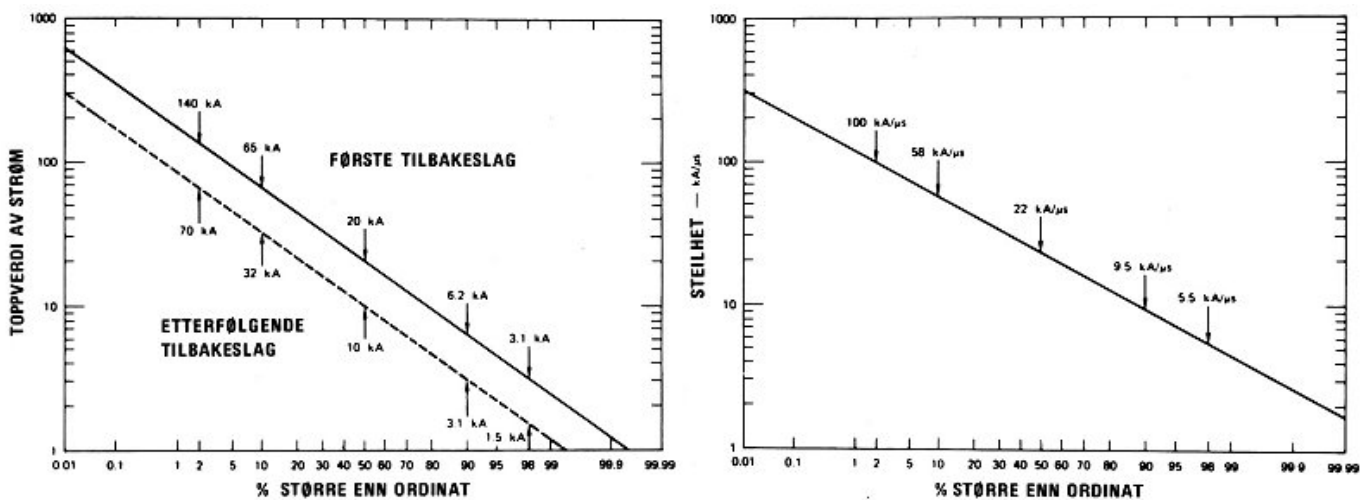
Eksempler på noen målinger av lynstrømmen nær bakken og steilheten av fronten er vist nedenfor (2). Målingene ble utført av Dr Berger på Mount San Salvatore i Sveits.



Eksempler på måling av strømmer i lyn i Sveits.

Den maksimale flankesteilhet (kA/μs) er angitt.

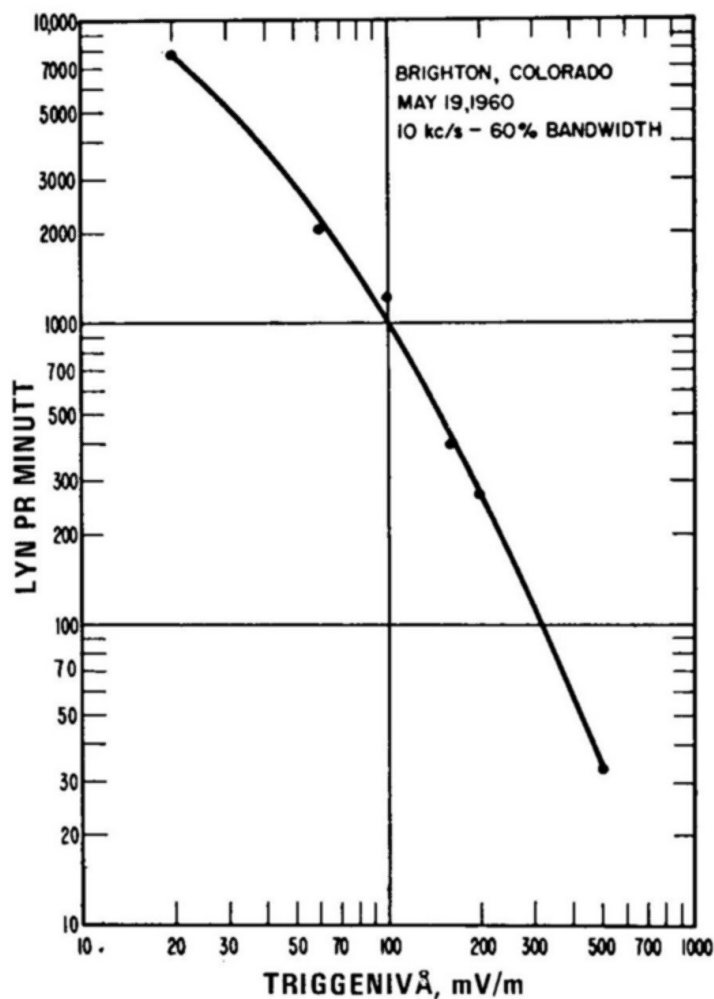
Statistiske data fra målinger i USA over lynstrømmenes styrke og flankesteilhet er vist nedenfor (3).



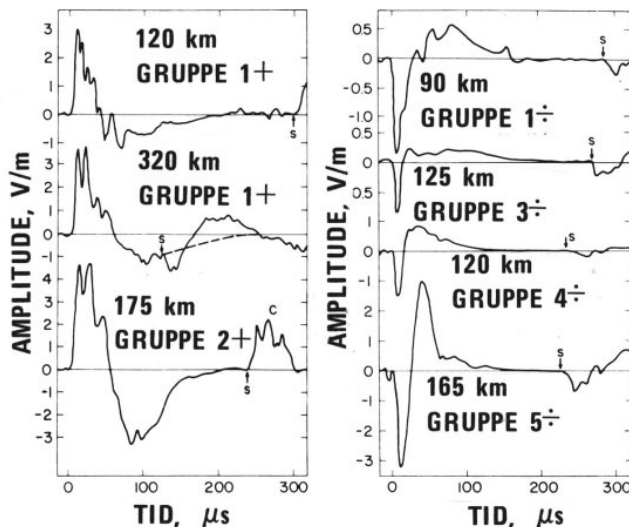
Statistikk over styrke og flankesteilhet av lynstrømmer. Styrke (kA) venstre og flankesteilhet (kA/μs), høyre. Kurvene angir det antall av lyn som overstiger de angitte verdier for strøm og flankesteilhet.

Hyppegheten av EMP fra lyn registrert i USA for en bestemt dag er vist nedenfor. Antall EMP pr minutt som ble detektert av fjernregistreringsutstyret er vist som funksjon av registrerings- (trigge-) nivået til utstyret (mV/m). Varigheten av hver registrering var $5001 \mu\text{s}$. Ved et triggernivå på 20 mV/m ble det på et tidspunkt målt over 200 lyn i sekundet (4). Et omfattende system er nødvendig for å kunne registrere og ta vare på slike mengder med data. I tidligere tider var en henvist til å benytte analoge oscilloskop der skjermen ble fotografert fortløpende på 35 mm film. Opptil ca 20 registreringer i sekundet kunne være mulig med slikt utstyr.

EMP fra lyn blir målt mange steder i Norge for å kunne sette inn tiltak mot utfall av kraftforsyningen p. g. a. skade på nett og el-installasjoner. I Norge er det Sintef Energiforskning (SEFAS) som forsker på lyn. Sintef og Statnett har en kontinuerlig [overvåkning](#) av lynaktiviteten i Norge. Negative lyn er mest forekommende i innlandet (ca. 90%). Positive lyn forekommer ca. 10% i innlandet og ca. 50 % langs kysten. De kan være 10 ganger sterkere enn negative lyn.



Eksempel på antall fjernregistreringer av lyn som funksjon av registrerings- (trigge-) nivået til deteksjonsutstyret (4).



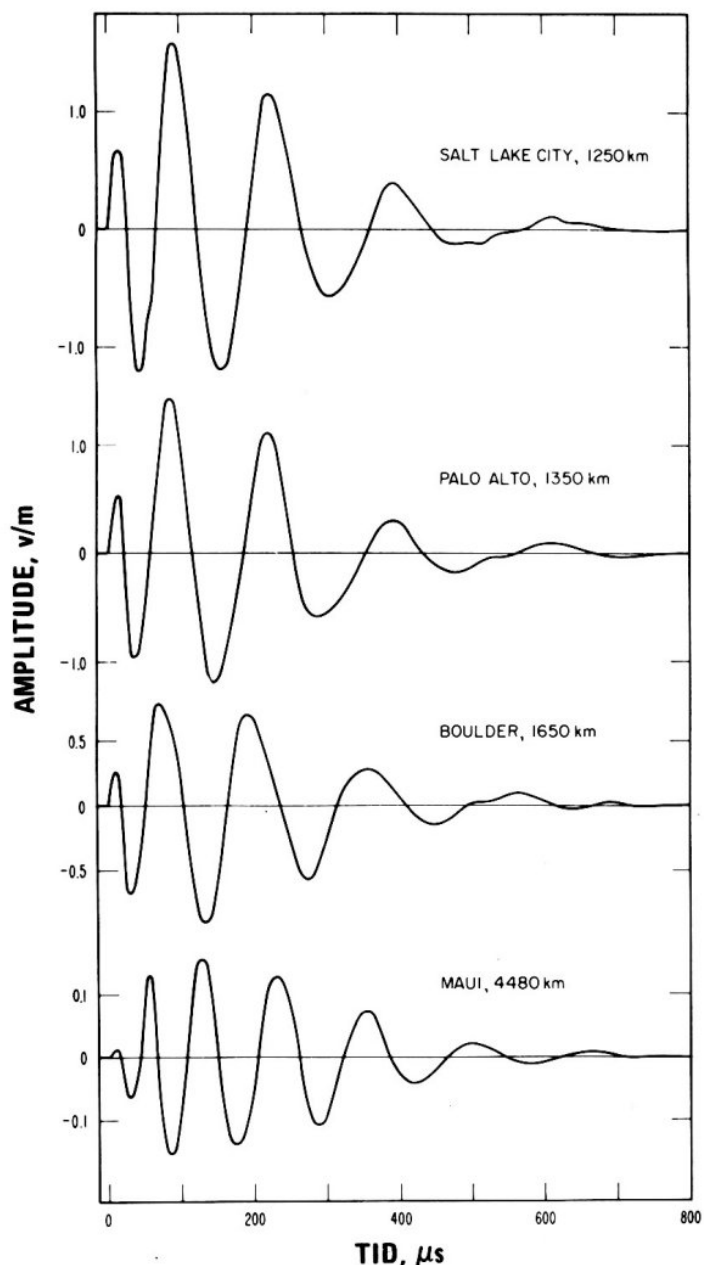
Eksempler på EMP fra lyn (5).

Lynene er her inndelt i 5 grupper der det første pulssvingkan være både positivt og negativt. s indikerer ankomsten av det første ionosfærereflekterte signal.

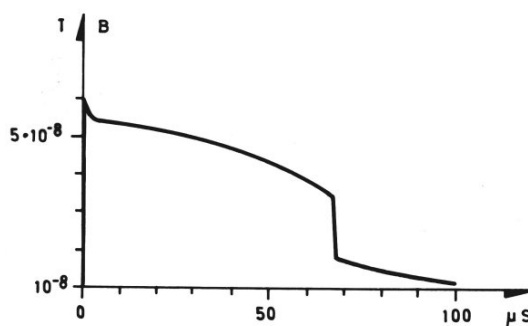
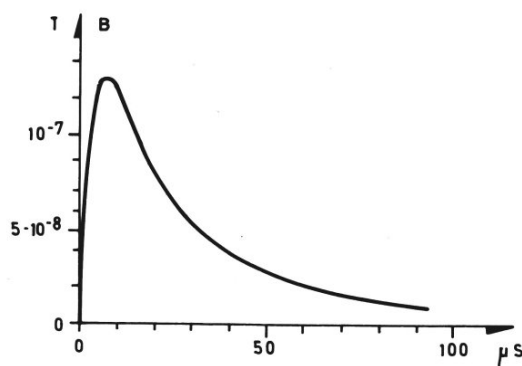
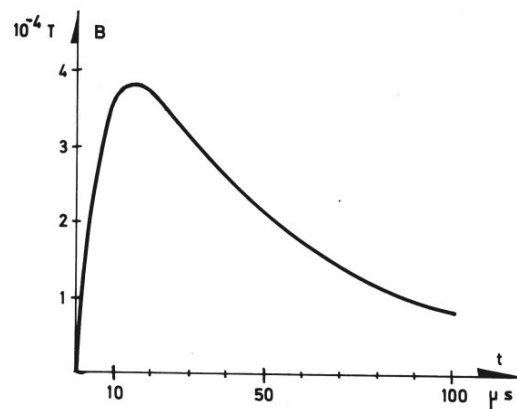
EMP fra lyn har vist seg å variere meget i tidsforløp og styrke. Det er derfor ikke mulig å gi en enkel beskrivelse av EMP fra lyn. I en undersøkelse (5) har en inndelt de målte EMP (1029 stk) i 5 forskjellige grupper der første puls i hver gruppe kunne være både positiv eller negativ. Eksempler på målte EMP er vist ovenfor. Gruppe 5 representerte de kraftigste EMP med midlere utstrålt EMP på 226 kJ . Det ble målt en EMP med en beregnet

utstrålt energi på 800 kJ. Gruppe 4 representerte de svakeste EMP med midlere utstrålt energi på 6,6 kJ.

Målinger av EMP i meget store avstander fra kraftige lyn er vist i figuren. En har bl. a. funnet at utbredelse fra øst til vest er noe forskjellig fra utbredelse i den motsatte retningen. Dette skyldes innflytelsen av jordens magnetfelt. Det foreligger få målinger av EMP i korte avstander fra lyn. Et beregnet magnetfelt 10 m fra et middels lyn er vist sammen med tilsvarende magnetfelt i 10 km avstand.



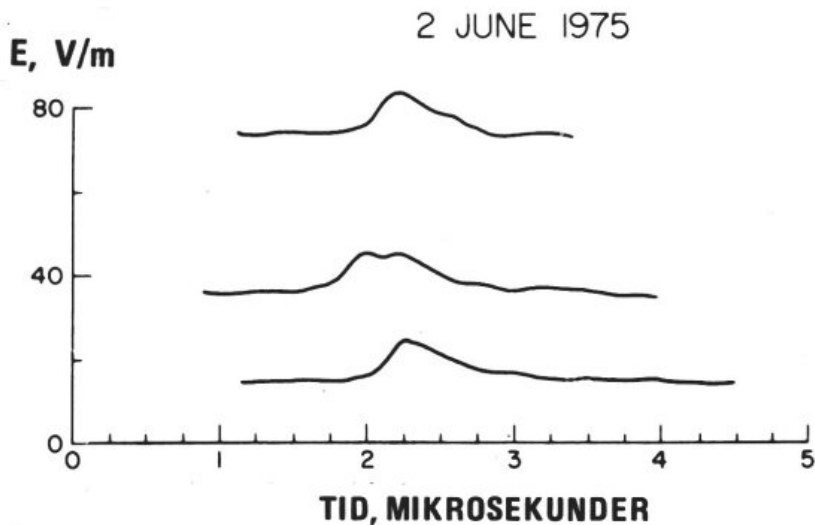
Eksempel på registrering av lyn i store avstander (6).



Beregnet magnetisk felt (T, tesla) fra middels lyn som funksjon av tid (7).

Øverst: Avstand 10 m fra første tilbakeslag, lynstrøm 30 kA
 Midten: Avstand 10 km fra første tilbakeslag, lynstrøm 30 kA
 Nederst: Avstand 10 km fra et senere tilbakeslag, lynstrøm 10 kA
 I disse avstander dominerer induksjonsfeltkomponenten.
 I større avstander blir strålingskomponenten den dominerende og feltforløpet blir oscillatorisk.

Strømmen i trinnvise lederlyn ("stepped leaders") gir også EMP, men denne har liten styrke og kortere varighet. En måling er vist i figuren. Stigetiden av den målte puls (ca 100 ns) ble begrenset av instrumenteringen og kan ha vært noe mindre i virkeligheten (8). Selv om denne EMP kan ha liten styrke kan den gi skade på hurtig IKT-utstyr.



Måling av elektrisk felt fra trinnvise lederlyn ("stepped leader") i en avstand på anslagsvis 20 km over sjøvann (8)

EMP FRA KJERNEEKSPLOSJONER

Ved en kjernevåpeneksplosjon sendes det ut, i tillegg til trykkbølgen og den radioaktive og termiske stråling, en kortvarig elektromagnetisk bølge som kalles elektromagnetisk puls eller EMP (9). Den er også blitt kalt "radioflash".

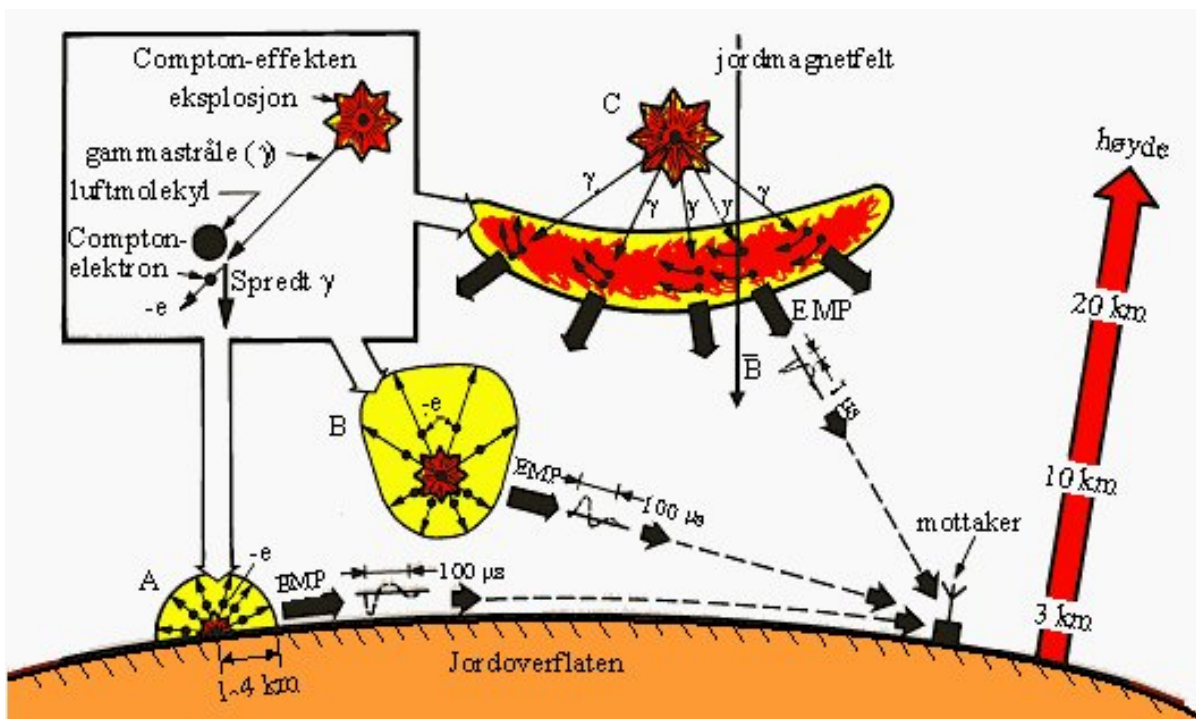
Anslagsvis 0,01% av den utløste energi ved eksplosjonen sendes ut i form av EMP, d v s ca 100 kWh pr kilotonn (kt). Største delen av energien ligger i frekvensområdet for radio og radar.

EMP ble oppdaget under kjernevåpenprøvene ved at den vanskeliggjorde målingene eller ødela instrumenteringen. Det ble snart klart at EMP kunne gi alvorlige skader på elektrisk utstyr i store avstander. På den annen side kunne EMP nyttes for fjernregistrering av kjerneeksplosjoner. Således ble EMP for eksempel brukt av amerikanerne for å detektere, stedfeste, og måle størrelsen av russiske og kinetiske prøvesprengninger (10).

Fysisk årsak til EMP

Generering av EMP skyldes den såkalte Compton-effekten som ble oppdaget av den engelske fysiker A H Compton i 1922. Den intense kjernestråling (gammastråling) fra eksplosjonen vil stoppes i atmosfæren. Dette skjer ved at gammastrålingspartikler (fotoner) støter sammen med luftmolekyler. Ved en slik kollisjon støtes det ut et elektron som gir en elektrisk strøm i radiell retning fra eksplosjonen (se firkanten i figuren). På grunn av separasjon av ladning bygges det også opp et radielt rettet elektrisk felt. Hvert elektron bremses opp ved at det river løs ca $3 \cdot 10^4$ elektroner fra andre luftmolekyler. Luften blir derved elektrisk ledende (ionisert). Rekkevidden til gammastrålene som genererer strømmene og det elektriske felt, er et par kilometer nær jordoverflaten og flere titalls kilometer i stor høyde. Rekkevidden er omvendt proporsjonal med luftens tetthet. Generering av strømmer vil også kunne foregå i andre stoffer enn luft, f eks i komponenter i utstyr (Intern EMP, IEMP). Det genereres også fotostrømmer som gir skadevirkninger i halvledere.

Det var meget kostbart og vanskelig å utføre målinger av EMP ved prøvesprengningene og resultater ble holdt strengt hemmelige. Det ble derfor bygget opp store regneprogram for å simulere genereringen av EMP, også her hjemme (1b). Dermed kunne en fastslå hvordan denne virkningen varierte med de forskjellige faktorer som bl. a. avstand og sprengningssted. Dette hadde stor betydning for å kunne konstruere optimale beskyttelsesmetoder.



Skjematisk skisse av EMP-generering ved eksplosjoner i forskjellige høyder (A, B og C)

De innregnede områder viser utstrekningen av de strømmene i atmosfæren (Comptonelektroner) som genererer EMP

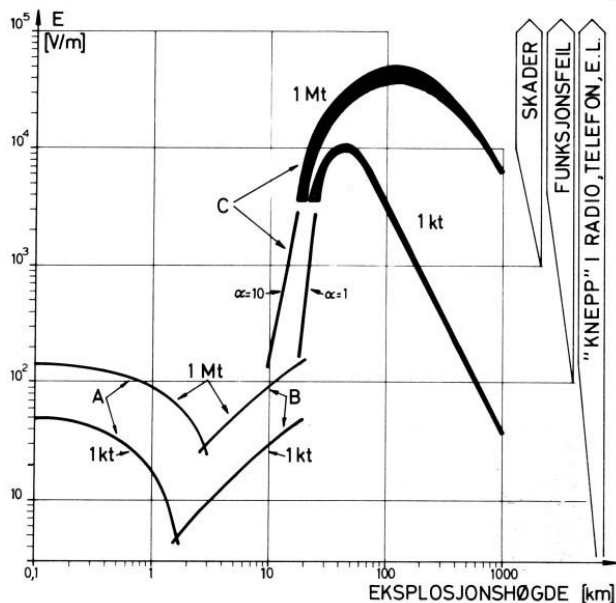
A eksplosjon i høyde 0-2 km

B 2-20 km

C 0-100 000 km

Strømmene i luften fører til utstråling av elektromagnetisk energi på samme vis som strømmen i en vanlig senderantenne (dipol). Dersom strømmene rundt eksplosjonsstedet var helt kulesymmetriske fordelt, ville strålingsbidragene fra de forskjellige strømmene oppheve hverandre. I praksis vil imidlertid ikke strømmene være helt symmetriske.

Tre forskjellige typer EMP (A, B, C) kan opptre, som vist i figuren. Styrken av disse varierer forskjellig med eksplosjonshøyden og den EMP som registreres kan være sammensatt av disse tre:



Estimat av EMP feltstyrker i 100 km avstand fra nullpunktet som funksjon av eksplosjonens høyde over bakken.

Funksjonsfeil, f. eks. i IKT-utstyr, kan opptre ved 1000 V/m.

Ekspløsjonshøyde 0-2 km (type A)

Utstråling av EMP skyldes manglende symmetri i de radielle Compton-strømmer rundt eksplosjonspunktet. Asymmetrien oppstår fordi bakken stopper gammastrålene og hindrer nedoverrettede strømmer. Strømmene i luften, som har en rekkevidde på anslagsvis 1-4 km (avhengig av våpenstyrken), danner i middel en vertikal elektrisk dipol. EMP avtar med økende eksplosjonshøyde, fordi graden av symmetri øker. Når eksplosjonshøyden er mer enn 1-3 km (avhengig av våpenstørrelsen), blir denne EMP kraftig redusert. Det elektriske feltet er overveiende vertikalt rettet.

Det første pulssving, som vanligvis er størst, har negativ polaritet og en varighet til nullgjennomgangen som er beregnet til 7-25 μs avhengig av våpenstørrelsen. Etter første pulssving opptrer det et dempet oscillatorisk forløp som kan tilnærmes med en funksjon av tiden (t) av typen (10):

$$e^{-\beta t} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + \text{Thet})$$

Thet gir en egnet tidsforskyvning. Dempningsfaktoren β kan være av størrelsesorden $3-5 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$ (9), mens frekvensen f er avhengig av dimensjonene på den effektive kuleformede dipolantenne. For resonansfrekvensen (f) av en slik antenne (i vakuum) blir det oppgitt

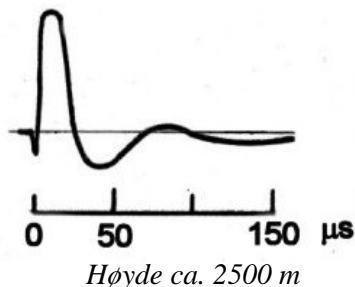
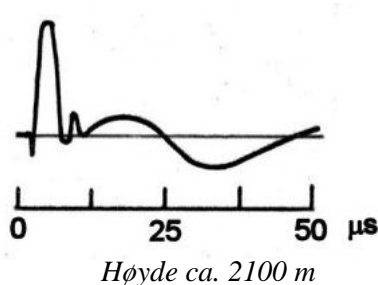
$$f = 4,1 \cdot 10^7 / a \text{ (Hz)}$$

der a er radius i kulen (m).

For en eksplosjon på 1 kt nær bakken kan a estimeres til ca 1,5 km og frekvensen blir da anslagsvis 30 kHz. For 1 Mt blir den tilsvarende radius ca 4 km og frekvensen ca 10 kHz. Siden rekkevidden av Compton-strømmene øker med høyden, blir frekvensene noe lavere når eksplosjonshøyden økes.

Ekspløsjonshøyde 2-20 km (type B)

Styrken av EMP når et minimum ved eksplosjonshøyder på 1-3 km (avhengig av våpenstørrelsen) fordi denne type EMP har motsatt polaritet og motvirker type A. Økes høyden ytterligere blir dermed første pulssving positivt og større enn etterfølgende sving.



EMP skyldes asymmetri i Compton-strømmene rundt eksplosjonspunktet. Denne asymmetri oppstår her fordi rekkevidden av strømmene øker med høyden (avtagende tetthet av luften). Det dannes derfor en vertikal dipol. Denne type EMP øker med eksplosjonshøyden og er neglisjerbar ved eksplosjoner i lav høyde. Det etterfølgende oscillatoriske forløp har en frekvens som avtar noe med eksplosjonshøyden, og som derfor er lavere enn for type A.

De angitte verdier for B er usikre p. g. a. få frigitte observasjoner. Det er rimelig å anta at feltstyrken ikke øker vesentlig for eksplosjonshøyder over 20 km.

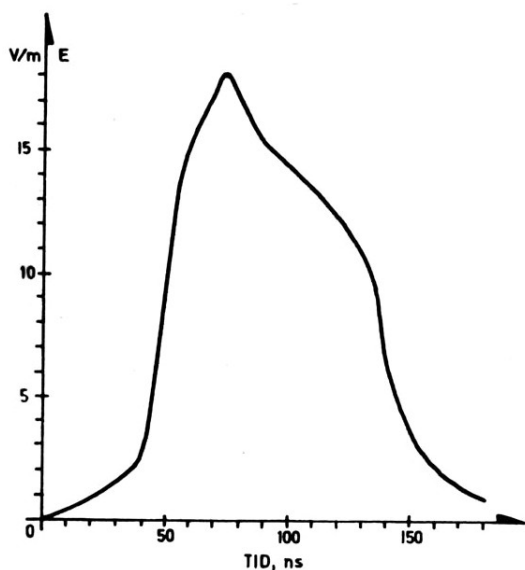
Ekspløsjonshøyde 0-100 000 km (type C)

Ved eksplosjoner i stor høyde vil Compton-strømmer, som nevnt for type B, genereres over store områder av atmosfæren. Siden de er radielle og divergerer, genereres det forholdsvis lite EMP. I disse høyder er det derimot

en annen effekt som gir sterk EMP. Denne EMP skyldes at Compton-strømmene avbøyes av jordens magnetfelt. Strømmene får da en komponent på tvers av den radiale retning, og gir dermed en kraftig utstråling. Rekkevidden av de avbøyde strømmer øker med eksplosjonshøyden.

Ved høyder over 50 km der tettheten av luften er meget liten, blir forholdsvis lite Compton-strøm generert. Ved eksplosjoner i slike høyder er genereringen derfor størst i høyder på 20-50 km, og den stråling som går oppover har liten innflytelse (går tapt). EMP øker sterkt med økende eksplosjonshøyde og det elektriske felt er overveiende horisontalt rettet. Som vist nedenfor er denne EMP meget kortvarig. Feltstyrken kan bli opptil 50 kV/m.

Ved eksplosjoner i høyder under 10 km (troposfæren) kan feltstyrken bli 1-50 V/m i 100 km avstand, avhengig av bl a sikt, høyde, retning, og hvor raskt γ -utstrålingen finner sted (gitt ved faktoren α). Pulsen etterfølges av et mer langsomt varierende felt. Stigetiden av denne målte puls var begrenset av stigetiden på det registrerende instrumentet (10 ns). Eksplosjonsstyrken var liten, og avstanden av størrelsesorden 20 km (11).



Måling av EMP ved sprengning i troposfæren (11).

Ved eksplosjoner nær bakken kan denne EMP bli liten i forhold til de etterfølgende EMP-felter som opptrer, slik at den blir vanskelig å observere.

Eksplosjoner i verdensrommet

γ -strålingen fra et våpen er ikke nødvendigvis like stor i alle retninger. De Compton-elektroner som støtes ut fra materialer i bombeskallet eller våpenbæreren kan dermed få en asymmetrisk fordeling i rommet, slik at det utstråles EMP. Denne EMP, som er meget kortvarig, kan økes ved en egnet konstruksjon av våpenet slik at bl a asymmetrien og hurtigheten av γ -utstrålingen økes.

EMP på vei mot jorden vil svekkes og endres i ionosfæren.

En asymmetrisk utstråling fra våpenet vil også generere EMP ved eksplosjoner i atmosfæren. Denne EMP vil trolig kunne bli overskygget av virkning A, B eller C. Effekten kan imidlertid tenkes utnyttet til å øke EMP ved å øke γ -strålingen i de retninger der den vesentligste EMP-generering finner sted.

Magnetiske pulser ([se Geomagn.pdf, 950 kB](#))

Ildkulen som opptrer rundt eksplosjonssenteret består av et ionisert plasma og er elektrisk ledende. Ildkulen vil forstyrre jordens magnetiske felt når den ekspanderer med en stor hastighet (over 10^3 m/s). Jordens magnetiske felt blir delvis kansellert inne i ildkulen. Dette kan beskrives ved en magnetisk dipol inne i ildkulen som virker mot jordmagnetfeltet. Styrken (dipolmomentet) av denne dipol er proporsjonal med plasmavolumet. Volumet, og

dermed det genererte magnetfelt, øker med våpenstørrelsen og eksplosjonshøyden.

Ladde partikler vil også akselereres langs jordmagnetfeltlinjene og gi opphav til andre forstyrrelser. Det opptrer derfor langvarige magnetiske pulser som etterfølger EMP. Rekkevidden av slike virkninger øker med eksplosjonshøyden.

SKADEVIRKNINGER VED KJERNEVÅPENPRØVER

EMP kan indusere kortvarige strømpulser i kabler. Styrken av disse strømmene vil vanligvis øke med lengden og tykkelsen av kablene. Skadevirkninger kan opptre dersom strømmene når fram til utstyr som er for svakt dimensjonert til å kunne motstå den energi som blir tilført. Skaden vil hovedsakelig opptre på gnistoverslag i ledninger og komponenter. I slike utladninger blir energien konsentrert i et lite volum der det kan opptre en meget høy temperatur, og skade er derfor mulig selv med forholdsvis små energier.

De største skadevirkninger har oppstått nær eksplosjoner, og det er kjent at kabler og utstyr er brent i stykker (12). Feltstyrkene like ved eksplosjonspunktet kan nå verdier på 100000 V/m og 0,01 Tesla .

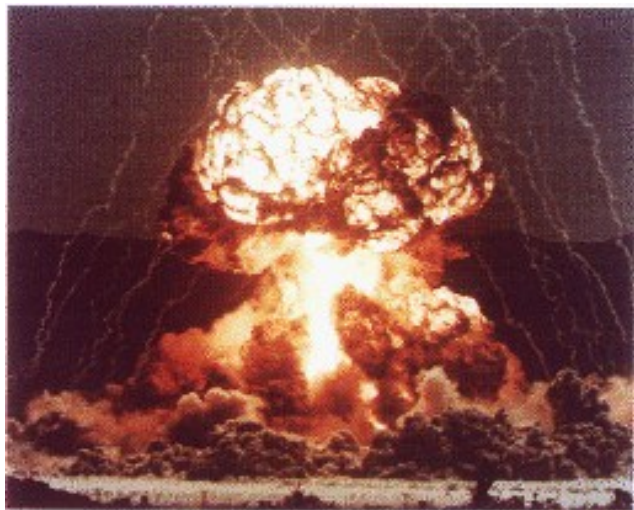
Det er også kjent at det har oppstått fjernvirkninger. Ved forsøk i Nevada (< 70 kt) ble f. eks. effektbrytere utløst på kraftlinjer 160 km borte enda det nærmeste punktet på linjen var ca 50 km fra eksplosjonsstedet (12).

EMP-virkningene er meget avhengige av eksplosjonens høyde over bakken. De kraftigste nærvirkninger oppsto ved eksplosjoner i lav høyde (< 1 km), mens de kraftigste fjernvirkninger opptrer ved eksplosjoner i store høyder (> 50 km). Ved eksplosjoner under bakken ble virkningene små.

Et omfattende opplegg av måleutstyr ble vanligvis brukt for å registrere de forskjellige våpenvirkninger ved forsøkene i Nevada. Ved bruk av elektrisk måleutstyr skapte EMP store problemer, først og fremst i utstyr for måling av trykkvirkninger og varmestråling. Følere og skrivere kunne brenne i stykker, eller de kunne bli overbelastet, slik at en ikke fikk brukbare målinger. Problemene ble etterhvert løst, hovedsakelig ved bruk av skjermede kabler og gnistgap (avledere). Den første tid ble det bl. a. benyttet vanlige tennplugger som avledere der elektrodene ble banket nærmere hverandre. Relekontakter som kortsluttet kabledere til gods mens EMP var ventet ble også brukt.

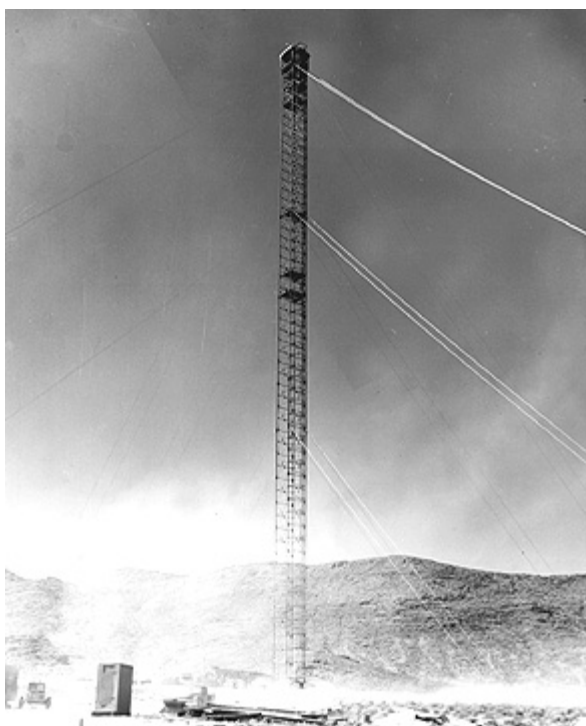
Registreringer av lufttrykk ved bruk av piezoelektriske følere og elektriske måleinstrumenter ble ødelagt allerede ved det første kjernevåpen som ble sprengt den 16 juli 1945 (13).

Ved en prøve i 1955 ble flere galvanometre i en skriver brent i stykker selv om det var brukt skjermede kabler fram til følerne. Skriveren var anbragt i et beskyttelsesrom lengst borte fra nullpunktet (760 m), mens kablene som var ca 600 m lange, var tilkoblet følerne (temperatur) som var montert over bakken 305 m fra nullpunktet. De kabler som ble benyttet var mikrofonkabler med flettet skjerm og tvundne par (14). Denne eksplosjonen (Met) var på 22 kt i en høyde på 122 m.



Ved et annet måleopplegg i avstand 610 m fra nullpunktet ved samme prøvesprengning gikk kabler som var skjermet ut fra et beskyttelsesrom og opp i flere tårn der temperaturfølere var anbrakt. Lengden på kablene var 20 - 50 m. Ved dette opplegg ble oppnådd flere brukbare målinger. Flere skrivere stanset imidlertid i eksplosjonsøyeblikket, men var brukbare etter forsøket (14). Den samme feil oppsto på skrivere i et dekningsrom som befant seg 320 m fra en eksplosjon i 1957 på 11 kt i 152 m høyde (15). I alle forsøkene ble lange kabler ført inn i dekningsrommene for å kunne gi automatisk start av skriverne fra et operasjonssenter.

I 1957 ble også flere tilfluktsrom av fransk konstruksjon prøvet i Nevada (16). Elektriske registreringer av trykk og temperatur inne i tilfluktsrommene ble ødelagt da det ikke var tatt noen spesielle forholdsregler. Amerikanerne hadde ikke villet fortelle franskmennene at det var nødvendig å beskytte mot EMP. Feilene skyldtes bl a gnistoverslag mellom strømforsyningskretser og lange kabler som ble ført inn i tilfluktsrommene for å gi automatisk start av alle skrivere. Overslag fant sted på relekontakter som delvis brente sammen. Batterier som skulle levere strøm for drift av skrivere ble derved kortsluttet. I andre skrivere brente sikringer over. Det elektriske anlegget i form av lysopplegg og to aggregater var imidlertid intakt etter prøven. Tilfluktsrommene, som hadde liten overdekning, befant seg ca 300 m fra en eksplosjon (Smoky) på 44 kt, og ble utsatt for et overtrykk på ca 1 MPa (10 bar). Som vist nedenfor ble bomben montert i et tårn i 213 m høyde.



En rekke forskjellige radioapparater, telefonutstyr og et TV apparat ble testet av det amerikanske sivilforsvar i 1955 (17). Utstyret var plassert i en bunker ca 100 m fra en bombe på 30 kt montert i 150 m høyde. Selv om det ytre av disse apparater til dels var sterkt skadet av mekaniske påkjenninger, virket stort sett alt utstyret etter prøven. Apparatene var dengang utelukkende basert på radiorør som er forholdsvis robuste mot EMP-virkninger. I løpet av 60-årene ble det tatt i bruk halvlederkomponenter som er svært sårbar for slike overspenninger.

Ved enkelte prøver i USA ble transformatorer i kraftforsyningsanlegg nær prøvofeltet ødelagt p g a gnistoverslag, da lynavledeanlegget ga for dårlig beskyttelse. Effektbrytere i fordelingsanlegg for kraftlinjer kunne utløses i avstander på over 50 km fra eksplosjonsstedet i det samme øyeblikk som en eksplosjon fant sted (10). En hadde bl a personell på vakt som koplet strømmen inn igjen så snart som mulig. Kabler skal også være ødelagt ved at gnistoverslag brente istykker isolasjonen (12). I en stor amerikansk håndbok om EMP (18) ble det vist et bilde av en slik skade:



Det er også kjent at EMP førte til problemer med instrumenteringen ved engelske prøvesprengninger. De benyttet derfor hovedsakelig måleutstyr som var basert på mekaniske prinsipper i sine prøver (19). Det ble imidlertid til dels benyttet elektriske motorer med batterier for drift av skrivere. Noen registreringer ble ødelagt under prøver i Australia i 1956 (Maralinga) p g a EMP-virkninger på tidsmarkeringsmekanismer og på sikringer. Engelske forskere fortalte også at et elektrisk instrument som skulle måle kjernestrålingen fra de første prøveeksplisjonene, ga maksimalt mulige utslag ved prøvene til tross for en grundig kalibrering før hver prøve. Det ble ikke opplyst at noen kabler ble skadet p g a EMP. En kabel som ble ødelagt, ble antatt å være skadet av trykkvirkninger.

Resultater av registreringer som ble gjort i USA av strømmer i kabler er ikke frigitt, men det er kjent at det er målt intense strømmer og overspenninger på kabler (20). Strømstyrken er avhengig av hvor godt bakken leder strøm. Fjellgrunn og tørr sand som leder strøm dårligst gir mest strøm i kabler. I Nevada er jordsmonnet (tuff) av en rent spesiell beskaffenhet med usedvanlig høy ledningsevne, omtrent som for våt jord. En skulle derfor vente at strømmene var lavere her enn ved tilsvarende målinger andre steder.

Ved den fjerde prøvesprengning som fant sted i Sahara i 1961 søkte franskmennene å måle den totale strøm som ble generert av en eksplosjon på noen få kilotonn i lav høyde over bakken. Et nett med ca 250 radielle kobbertråder i vifteform som var flere hundre meter lange ble lagt på bakken under bomben som var montert i et tårn. Bakken besto av tørr sand med dårlig ledningsevne. Den ytterste ende av trådene i dette nett var koplet til en lang, tykk kabel av kobber (flere hundre kvadratmillimeter) som ble ført ut til en avstand av 3 km der den ble tilknyttet en rekke dype jordelektroder. Strømmen ble målt i kabelen på dette sted ved bruk av flere metoder. Analyser av målingene viste at strømmen i kabelen steg til 150 000 A i løpet av størrelsesorden 20 μ s. Strømmen avtok deretter og ble null etter 150 μ s, skiftet så polaritet og steg til 56 000 A igjen for deretter å "slukkes" ut (21). Denne strøm og den varighet den ble angitt å ha (> 150 μ s) var ikke særlig forskjellig fra den strøm som er målt i de aller kraftigste lynnedslag som er registrert.

Skadelige virkninger fra eksplosjoner i store høyder over bakken er blitt rapportert. Ved en eksplosjon i 1962 på 1,4 Mt (Starfish) i stor høyde (400 km) over Johnston-øya ble en rekke tyverialarmer, luftverns sirener og sikringer på nettet utløst i Honolulu, 1300 km fra Johnston-øya (22,23). 30 gatelys forskjellige steder på øya Oahu på Hawaii ble slukket. Disse gatelys besto av flere lamper i serie. Spesielle sikringer som skulle beskytte disse lamper ble ødelagt. Ved en eksplosjon samme sted i 1958 på ca. 4 Mt i en høyde av 77 km (Teak) ble det også angitt at det oppsto feil på elektrisk utstyr i Hawaii (24). En rekke andre virkninger som ble hemmeligholdt skal ha opptrått i elektronisk utstyr ved amerikanske prøver over bakken. Disse prøver tok slutt i 1962. Siden den tid er radiorør i elektronisk utstyr blitt erstattet med halvlederkomponenter. Slike komponenter er mye mere følsomme for elektriske pulser enn radiorør. Siden det er sterke frekvenskomponenter av størrelsesorden 100 MHz er moderne elektronikk svært sårbar. En må derfor regne med at EMP-virkninger kan få et større omfang i våre dager. En mer omfattende beskrivelse av EMP-virkninger ved de amerikanske prøver i stor høyde er gitt i (25). Denne beskrivelse gjengis her i sin helhet:

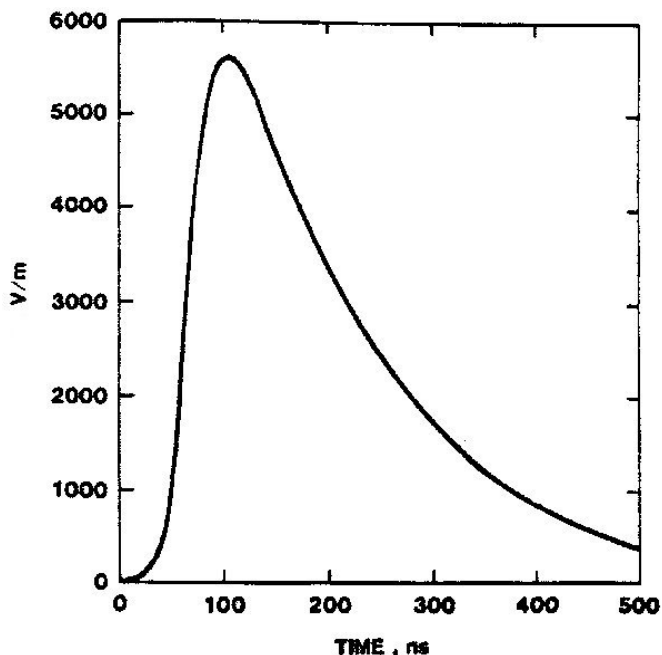
ELECTROMAGNETIC-RADIATION EFFECTS ON ELECTRICAL AND ELECTRONIC SYSTEMS. (Contribution by John Malik)

The electromagnetic radiation in the radio-frequency portion of the spectrum (EMP) can cause problems in electronic systems. The pulse from detonations above about 30 km is caused by the deflection of Compton electrons produced by gamma-ray interaction with

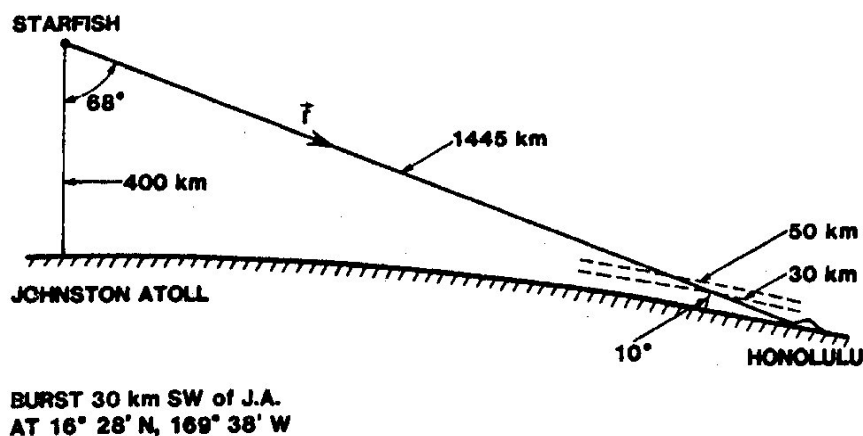
the earth's magnetic field in the deposition region (20-40 km). The resulting transverse current in the large area of gamma ray deposition produces a large coherent radiating element. With appropriate yield, detonation altitude, and magnetic azimuth, the electric fields over large areas at the earth's surface can exceed 10^4 V/m. Such fields can cause detrimental effects on some types of electrical systems. The pulse width is less than a microsecond.

Starfish produced the largest fields of the high-altitude detonations; they caused outages of the series-connected street-lighting systems of Oahu (Hawaii), probable failure of a microwave repeating station on Kauai, failure of the input stages of ionospheric sounders and damage to rectifiers in communication receivers. Other than the failure of the microwave link, no problem was noted in the telephone system. No failure was noted in the telemetry systems used for data transmission on board the many instrumentation rockets.

There was no apparent increase in radio or television repairs subsequent to any of the JI detonations. The failures observed were generally in the unprotected input stages of receivers or in rectifiers of electronic equipment; transients on the power line probably caused the rectifier failures. There was one failure in the unprotected part of an electronic system of the LASL Optical Station on top of Mount Haleakala on Maui Island. With the increase of solid-state circuitry over the vacuum-tube technology of 1962, the susceptibility of electronic equipment will be higher, and the probability of more problems for future detonations will be greater. However, if detonations are below line-of-sight, the fields and therefore system problems will be much smaller.



Måling på Hawaii av EMP
(vertikalfelt)
fra Starfish-eksplosjonen (26)



BURST 30 km SW of J.A.
AT 16° 28' N, 169° 38' W

Siktelinjen fra Starfish-eksplosjonen til
Honolulu (26)
Generering av EMP skjedde i 30 - 50 km høyde.

I Sovjet fant prøvesprengninger sted i stor høyde over bebodde områder i Kasakhstan. En burde derfor forvente at det ble observert skader på samband og kraftforsyning. Ved sprengningen den 22 oktober 1962 ble flere forsterkere tilknyttet en sivil luftledning øst for nullpunktet ødelagt. Forsterkere var plassert i avstander på 40 - 80 km langs luftledninger som vanligvis bestod av 7 ledere. Forsterkerne var beskyttet med lynavledere og smeltesikringer. Lynavlederne tente og sikringene smeltet. Denne luftledningen gikk fra Saryshagan sydover 290 km til Brlik og derfra 280 km østover til Almaty (Alma Ata). Avstanden fra Saryshagan til nullpunktet for eksplosjonen var 600 km, fra Brlig 730 km og fra Almaty 960 km. Denne spengningen fant sted i 290 km høyde over Baykonur med styrke på 300 kt. Strømmen i luftledningen ble estimert til anslagsvis 3,4 kA som hadde et maksimum ved ca 20 μ s i linjen som var 570 km lang med høyde 6,5 - 8,5 m over bakken. En kraftforsyningsenhet ble skadet 570 km fra nullpunktet og det ble funksjonsfeil på en radarinstallasjon i avstand 1000 km. Flere dieselgeneratorene på høyspentnettet og utstyr i understasjoner ble skadet etter å ha blitt utsatt for flere kV/m (http://home.earthlink.net/~hallmark_cl/id5.html).

Beskyttelse

I litteraturen fremgår det at EMP har ført til skade av kabler og utstyr. Det var mulig å forhindre slike skadevirkninger, og enkle tiltak kunne gi god beskyttelse. Dersom beskyttelsen tas med på et tidlig stadium i produktutvikling eller prosjektering medførte den små ekstra omkostninger (27).

For å kunne dimensjonere en beskyttelse er det nødvendig å vite hvor sårbart utstyret er. Elektromekanisk utstyr uten elektronikk er lite sårbart og beskyttelsen blir dermed enkel. For IKT-utstyr, som kan være meget sårbart, blir beskyttelsen mere komplisert. I USA ble det utført omfattende prøver av utstyr siden rundt 1960 (12). Men prøveresultater og beskyttelsesteknologier ble holdt strengt hemmelig. Deres direktiver for beskyttelse av NATO-anlegg gikk ut på at alt utstyr måtte monteres i rom skjernet med stålplater, selv langt inne i fjell. Likevel var det vanskelig å få god beskyttelse ved innføring av lange ytre kabler. De enkelte NATO-land måtte derfor bygge opp egne prøvefasiliteter for å finne ut hvordan en best skulle beskytte beredskapsmessig viktig utstyr optimalt. I Norge var det [Forsvarets forskningsinstitutt](#) som hadde denne oppgaven (28).

Det er forskjellige metoder en kan benytte for å teste om militært utstyr er sårbart eller utilstrekkelig beskyttet mot EMP. Til prøvingen nyttes en generator som gir pulser av høy spenning og et tidsforløp som er i samsvar med trusselen. Generatoren tilknyttes en linje eller antenne for å gi ønsket stråling. Det blir hovedsakelig benyttet tre forskjellige metoder:

1. Transmisjonslinje.

Pulser tilføres en bølgeleder eller en kabelstruktur. Det opptrer elektromagnetiske felter inne i denne strukturen. Høyde, bredde og lengde bør være minst 30% større enn dimensjonene av testobjektet.

Det største anlegg i Norge var temporært og ble brukt i 1990 til å teste marinefartøy. Mellom trådene og sjøen ble det generert et felt på 50 kV/m som vandret fra den ene siden av sundet til den andre.

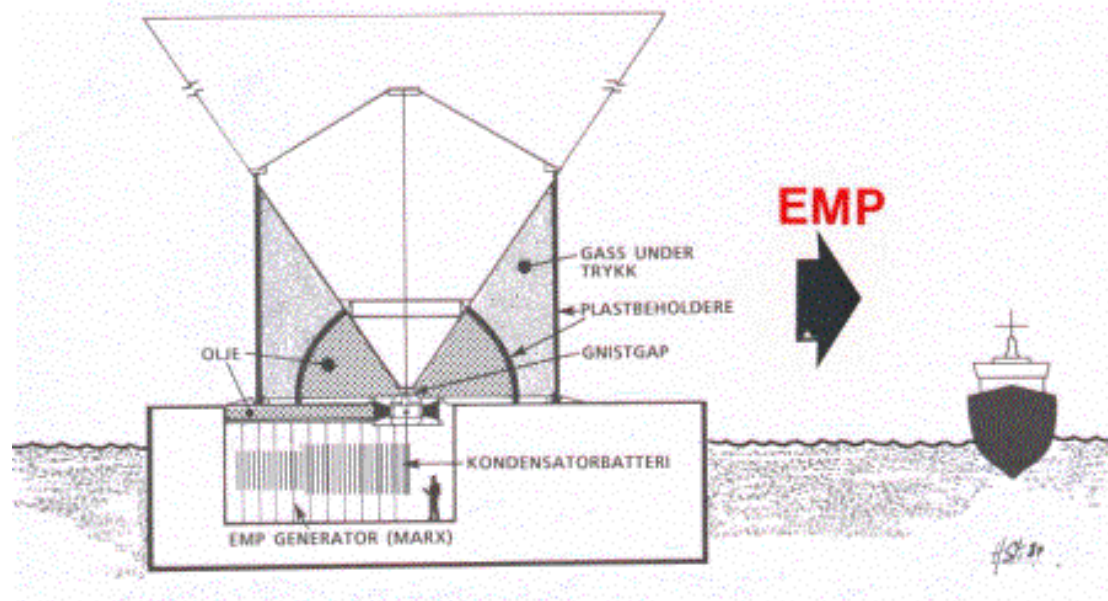


2. Antenner

Pulser tilføres bredbåndsantennener som gir utstråling til omgivelsene. Det er dermed mulig å bestråle utstyr og systemer med stor utstrekning.

Simulatoranlegg for EMP som har pulseffekter på TW (en million MW) har vært i drift i USA lenge. Noen simulatorer ga et felt på opptil 50 kV/m i 100 m avstand med en pulsspenning på inntil 7 MV i en konisk antenne av høyde 35 m. De fleste ble bygget på land for å bestråle mobile og stasjonære systemer. Her er vist prinsippet for anlegget EMPRESS II som ble bygget på en flåte for å bestråle

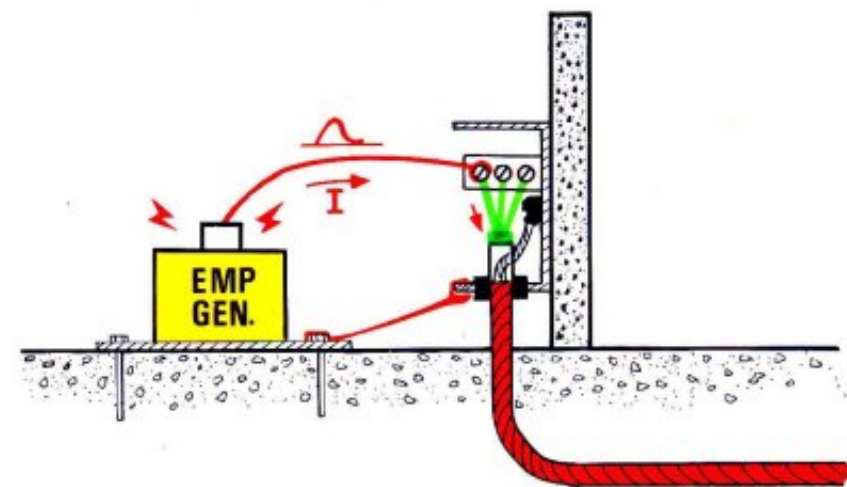
skip.



3. Strøminjeksjon

Pulsgeneratoren tilkobles kabler eller ledninger som går inn i utstyret, for å simulere den strøm som kan bli induisert av strålingen fra et våpen.

Prinsippskisse av forsøk der en intens puls kobles inn i inntakstavlen direkte til kabler som går in til anlegget. Den meget steile og kortvarige pulsen kunne være vanskeligere å beskytte seg mot enn en vanlig lynpuls.



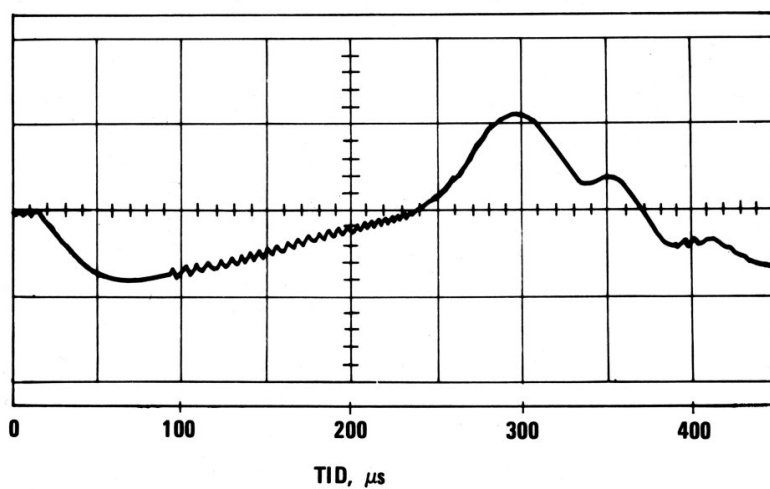
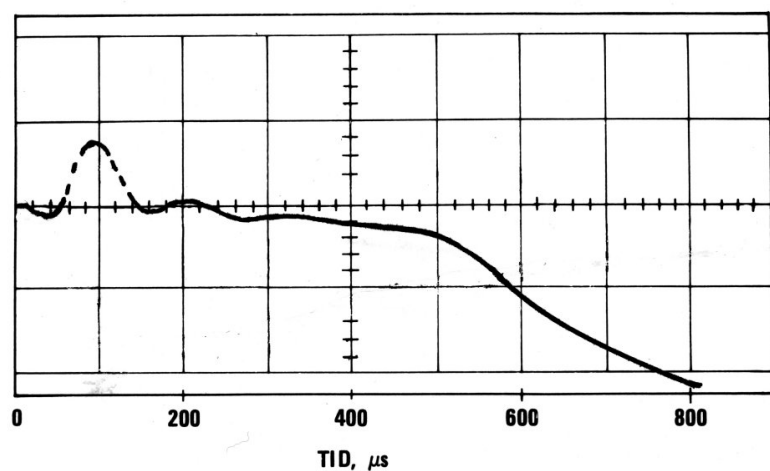
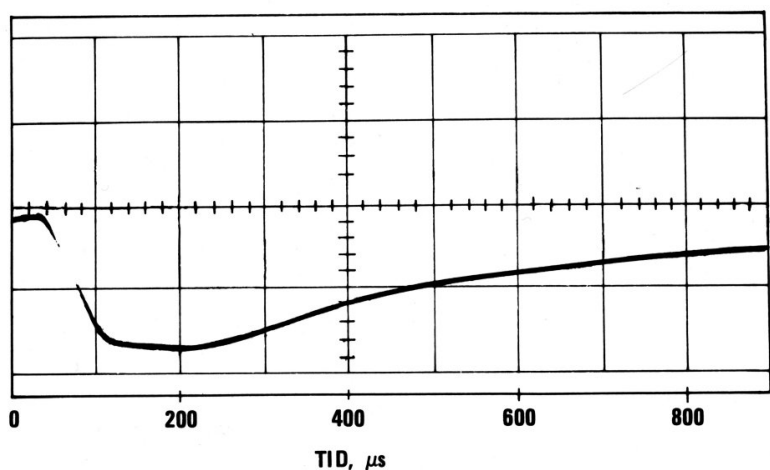
De elektromagnetiske pulsfeltene kan ikke føles og er ikke farlige for mennesker. En blir jevnlig bestrålt av lignende felt fra lynutladninger.

Registreringer av EMP

Eksplosjoner i lav høyde

Registreringer av det elektriske EMP-felt nær eksplosjoner ble foretatt av amerikanerne allerede i 1953 (AG Jean, National Bureau of Standards). Eksempler på slike målinger av EMP nær sprengninger i lav høyde er vist nedenfor. Båndbredden av det registrerende instrument var bare 0-10 kHz. På tross av den lave båndbredden kommer signalets karakteristiske trekk fram (29). Målingene viste at det oppsto langvarige elektriske felt og

elektrisk ladede nedfalls-skyer kunne drive langt vekk fra prøvelfeltet.



Målinger av det elektriske felt nær eksplosjoner i lav høyde (29).

Øverst : Måling i kort avstand fra eksplosjonsstedet .

Nederst: Måling i større avstand

Midterst: Måling på bakken nær en eksplosjon i større høyde. Vi ser at det opptrer et langvarig elektrisk felt.

Båndbredden av det registrerende instrument var bare 0-10 kHz. På tross av lav båndbredde kommer signalets karakteristiske trekk fram.

Mer nøyaktige målinger ble bl. a. utført i 1957 under prøvene Plumbbob under ledelse av Peter Haas ved Diamond Labs, der en også målte det magnetiske felt. En ville undersøke virkningene på magnetiske miner (30,50).

Målinger ble også utført i 1962 (Small Boy). Engelske forskere foretok også målinger av EMP i 50-årene (18).

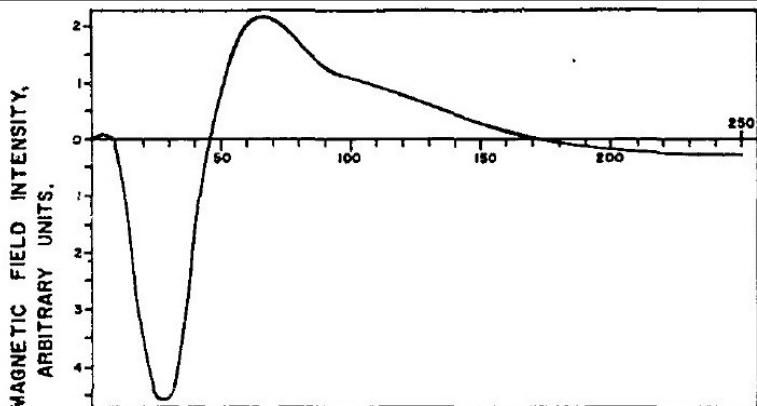
Instrumenteringen ble bl a skjermet mot EMP i et transportabelt rom av 1/2 tommers sammensveisede stålplater.

Den hemmelige rapporten (50) om målinger i 1957 av magnetiske felt er nedgradert og de viktigste data gjengis her. Målinger ble utført på sprengningene:

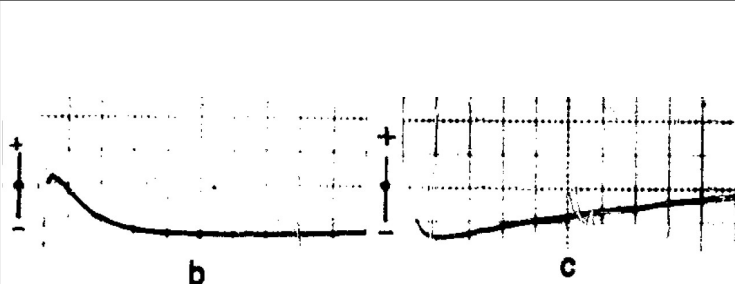
Lassen 0,5 t, høyde 500', ballong
 Wilson 10 kt, høyde 500', ballong
 Priscilla 37 kt, høyde 700', ballong

Hood 71 kt, høyde 1500', ballong
 Diablo 17 kt, høyde 500', tårn
 Owens 10 kt, høyde 500', ballong

Det ble benyttet båndopptagere (istedenfor oscilloskop) og båndbredden ble begrenset oppad til 200kHz. Registreringsavstand ca 300 m til 3 km med to forskjellige registreringssystemer, HF 0,3 - 200 kHz og LF 1Hz - 5 kHz. Magnetfelt ble estimert til å ha stigetid på 1 til flere μ s og varighet på opptil 0,1 s. (Presise målinger krever en båndbredde på 1 Hz - 100 MHz). De var kjent med at stigetiden kunne være mindre enn et μ s og dette ble bekreftet av målinger gjort av S.D. Abercrombie's gruppe ved AWRE, Aldermaston, England, som benyttet utstyr med en øvre båndbredde på 30 MHz.



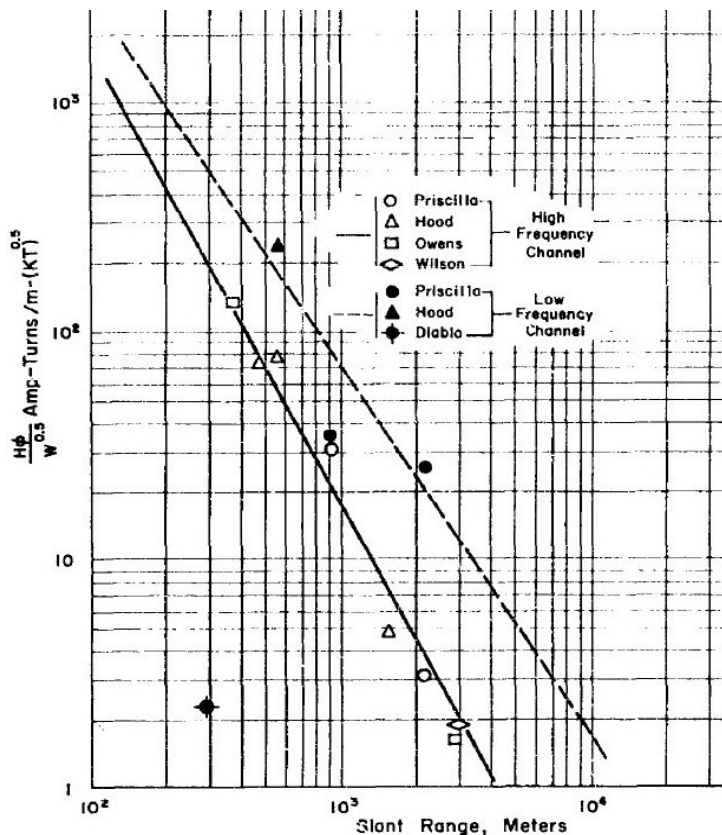
Estimert tidsforløp i μ s for magnetfelt i avstander på flere km. En antok at generering skjedde ved en vertikal dipol, 1 km lang/høg.



Magnetfeltnmåling (LF) fra Priscilla i avstand 938 m. Toppamplitude -290 A/m. Totalt tids-span for b: 10 ms, for c: 50 ms. Årsaken til det langvarige induksjonsfelt ved bakken fant man først senere ved datasimuleringer. Comp-tonstrømmer danner "loop" med returstrømmer i bakken.

TABLE 3.1 SUMMARY OF AMPLITUDES OF FIRST PEAKS, H_{ϕ}

Shot	Slant Range meters	Peak Amplitude ampere turns/meter	Peak Amplitude
			(yield) ^{1/2} ampere turns/meter
			kt ^{1/2}
HF Channels			
Priscilla	938	-183	-30.2
Priscilla	2,200	-20	-3.3
Hood	498	640	74.4
Hood	566	-673	-78.4
Owens	368	-432	-139
Owens	2,901	-4.9	-1.6
Wilson	2,901	-6.0	-1.9
LF Channels			
Priscilla	938	-290	-48
Priscilla	2,200	-145	-24
Hood	566	-2,000	-232
Diablo	298	-9.8	-2.3



Svært få resultater av EMP-målinger ble publisert.

Overflateekspløsjoner av Mt-klassen, bl. a. en på 10,4 Mt (Mike, 1952), har generert lynnedslag i avstander på inntil 1400 m fra eksplosjonspunktet. Dette skyldes kraftige elektriske felter i luften rundt eksplosjonen (31). Disse felt, som var vanskelige å måle, må ha vært av størrelsesorden 30 kV/m flere ms etter eksplosjonens begynnelse.

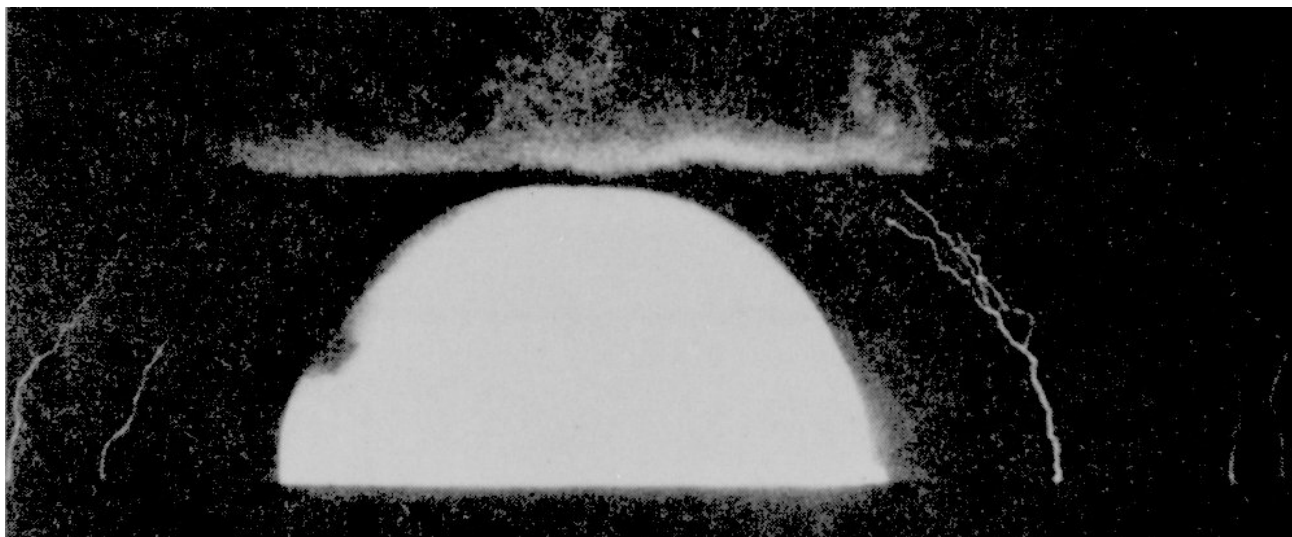
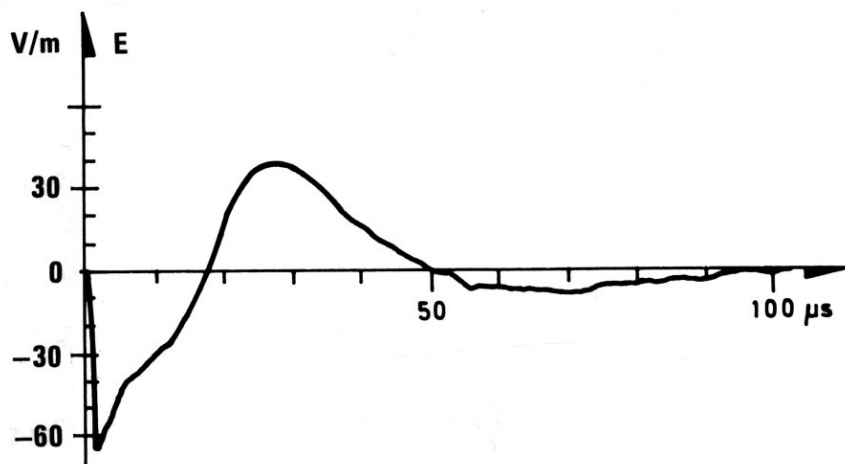


Foto av eksplosjon på 10 MT, 5 ms etter antennelsen.

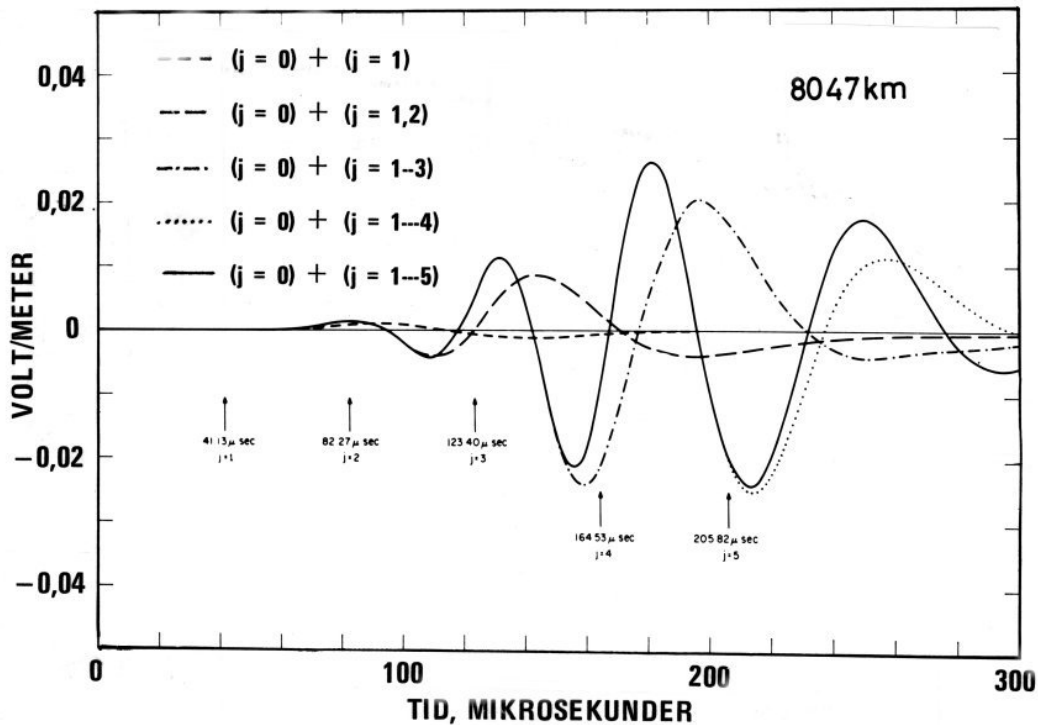
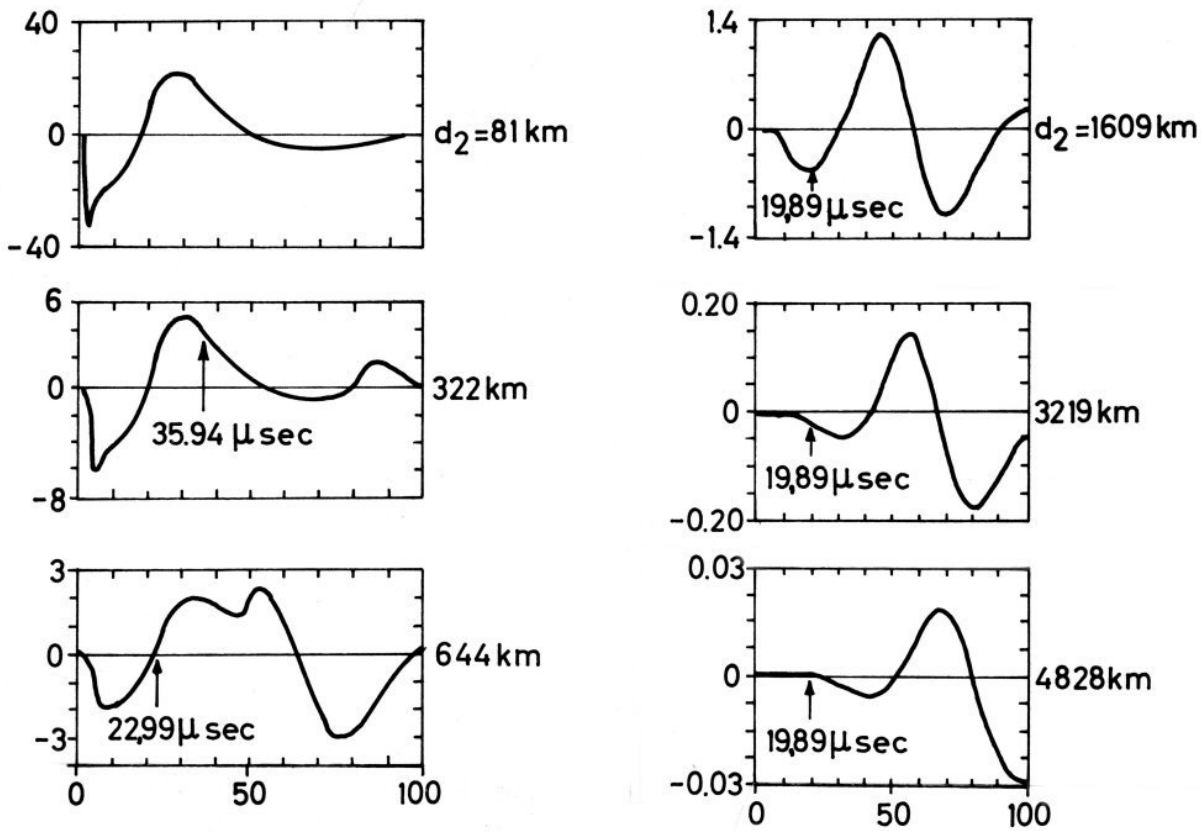
Noen lyn opptrer rundt eksplosjonspunktet, det fjerneste lyn i avstand 1400 m.

En måling av EMP i en avstand av 44,6 km er vist her (32). Eksplosjonen ble antatt å ha hatt forholdsvis liten styrke (ca. 1 kt) og ble sprengt i en høyde på ca. 0,9 km.



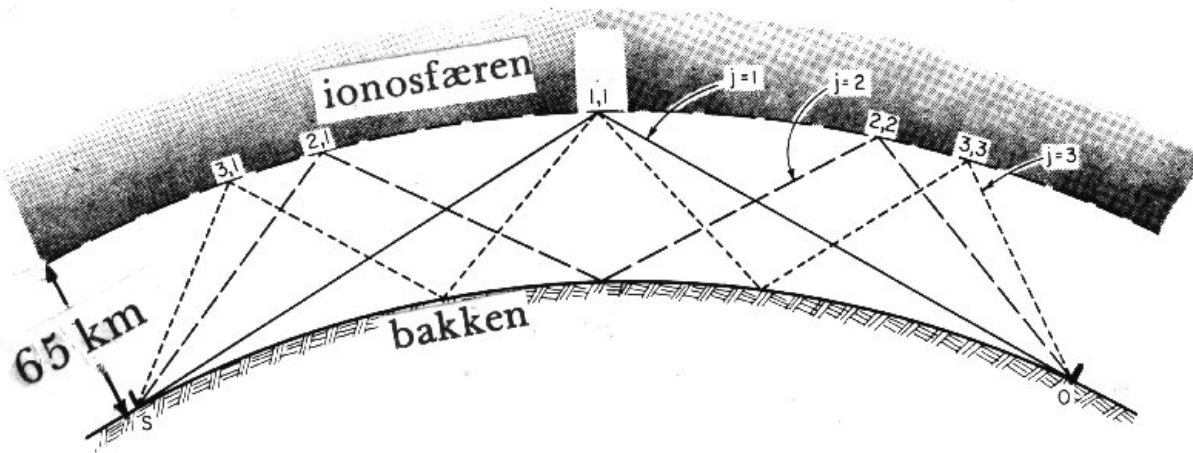
Elektrisk felt (vertikalt) målt i avstand 44,6 km.

Basert på måling av EMP i figuren ovenfor er det publisert beregninger av utbredelsen av denne EMP til store avstander (33). Noen resultater er gjengitt nedenfor. I avstander større enn ca 100 km gjør det ionosfære-reflekterte signal seg gjeldende. I meget store avstander er det bare de ionosfærereflekterte signal som når fram da jordbølgen ($j = 0$) blir sterkt svekket. I en bestemt avstand fra eksplosjonen er en rekke forskjellige reflekterte stråleveier (moder, $j = 1, 2, 3 \dots$) mulig som vist. Beregningene er basert på en modell av refleksjonsforholdene i ionosfæren som er typisk for forholdene om dagen. De forskjellige reflekterte EMP ankommer etter forskjellige tider og vil interferere. Forløpet av den resulterende EMP blir derfor komplisert og langvarig.



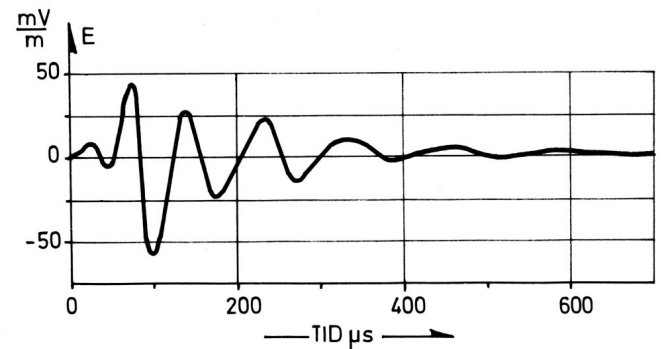
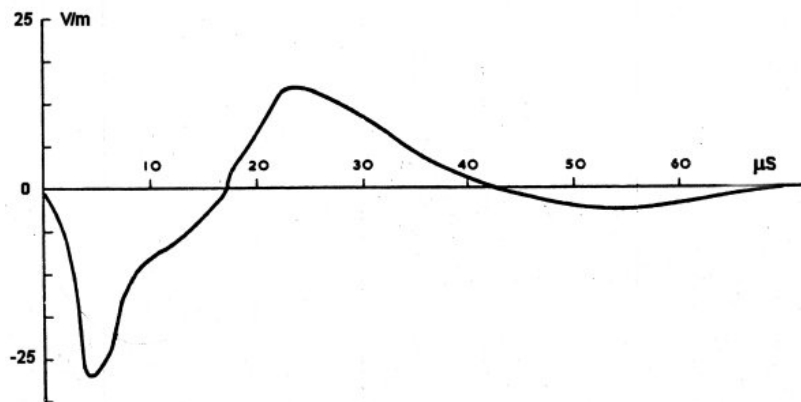
Beregnet forløp av EMP i økende avstander fra nullpunkter (33)

Beregningen er basert på målingen av EMP i forgående figur. Ledningsevnen av bakken er $5 \cdot 10^{-3}$ S/m. Jordbølgen dominerer i opptil noen hundre kilometer avstand. I større avstander er de reflekterte bølger sterkere. Kurvene viser amplituden av det elektriske felt i V/m som funksjon av tiden i mikrosekunder. Ankomsttiden til det første ionosfæreflekterte signal (j=1) er angitt for en antatt refleksjonshøyde på 65 km. På nederste kurve er også angitt ankomsttider for fire etterfølgende ionosfære-reflekterte signaler.



Utbredelse av EMP mellom jorden og ionosfæren
 De forskjellige stråleveier (moder) ($j=1,2,3, \dots$) er vist.

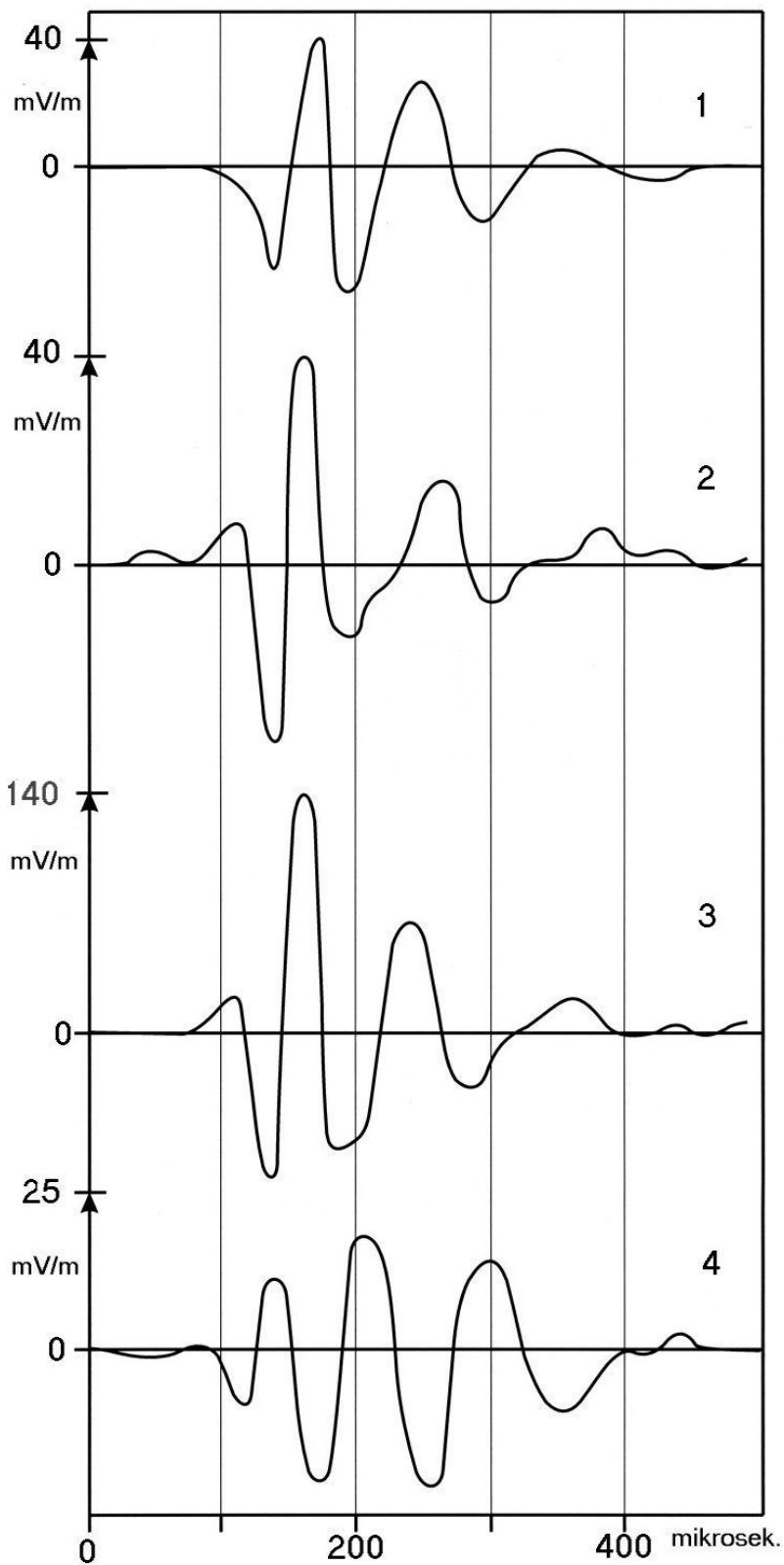
Det ble også målt EMP på Eniwetok-atollet fra eksplosjoner på på Bikini-atollet i en avstand av 320 km (34) (eksempel nedenfor). Ved eksplosjoner på overflaten ved Marshall-øyene, i årene 1954 til 1958, ble EMP målt i USA i avstander på opp til 9400 km (35). Eksplosjonen (Holly) som var ca. 6 kt fant sted på en flåte ved Eniwetok i 1958. Pulsen ble registrert i Los Angeles i avstand 8000 km (35) som vist nedenfor.



Pulsform og amplitude i slike store avstander er lite forskjellig fra EMP fra kraftige lyn i en tilsvarende avstand. Ved avstander under 1000 km blir imidlertid forskjellen mer markant. De høyfrekvente frekvenskomponenter i nukleær EMP fører der til at det første pulssving blir av større styrke og fronten steilere.

EMP fra den første franske prøveeksplosjon som fant sted i Sahara i 1960 (60-80 kt) ble målt i Paris 2500 km unna. Feltstyrkene ble oppgitt å være 0,1 V/m (36). Registreringen tyder imidlertid på at instrumentet ble overstyrt slik at feltstyrken kan ha vært større. I USA ble opplysninger om EMP hemmeligholdt slik at den første publikasjon om EMP var russisk (9). Deretter fulgte franske publikasjoner (36, 21).

I Kina ble det sprengt 23 bomber i atmosfæren i tiden 1964 til 1980 og noen ga EMP med stor rekkevidde. Siden 1982 har alle sprengninger vært under bakken og 22 slike prøvesprengninger ble utført frem til 1996.

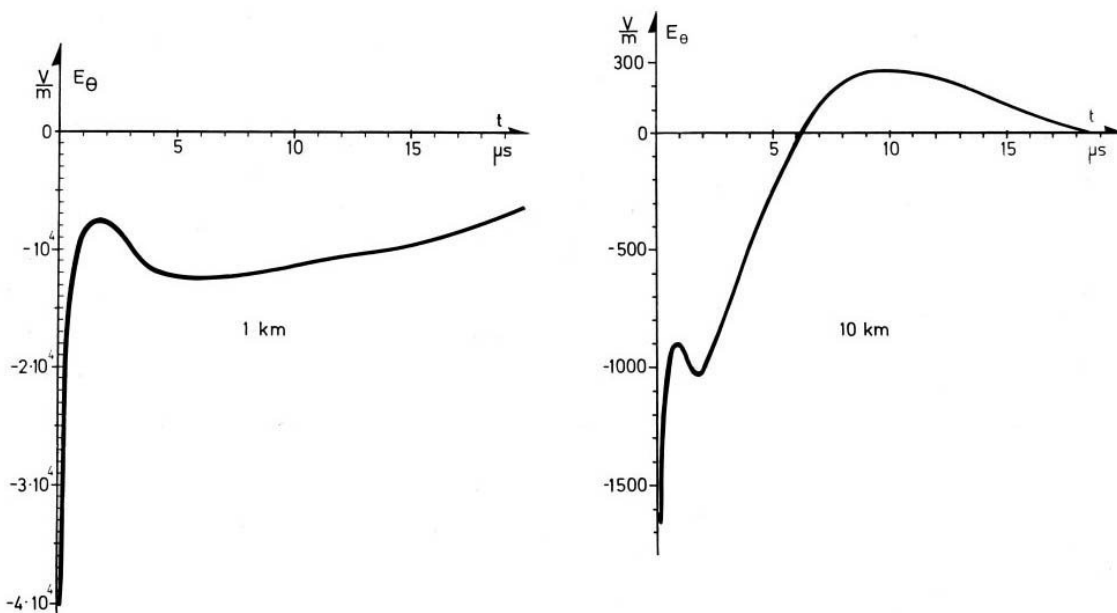


Eksempler på EMP fra Kina-eksplosjoner registrert i avstand på ca. 4700 km.

1. Dato: 08.05 1966, styrke ca. 200 kt, sluppet fra fly.
2. Dato: 27.10 1966, styrke ca. 20 kt, rakettprøve,
3. Dato: 27.12 1966, styrke ca. 300 kt, tårn.
4. Dato: 27.12 1968, styrke ca. 3 Mt, sluppet fra fly.

Vi ser at eksplosjonen den 27.12 1966 gir sterkest EMP siden den ble sprengt nær bakken. Det ble ikke sprengt noen ("EMP") bombe i stor høyde selv om Kina hadde langtrekkende raketter med muligheter for dette.

P g a få tilgjengelige målinger fra prøvesprengningene var kunnskap om EMP var meget begrenset, særlig i korte avstander fra nullpunktet. Slik kunnskap var viktig utarbeidelse av beskyttelsestiltak. Det ble derfor utviklet regneprogram for å kunne estimere styrke og tidsforløp av EMP. Forskjellige parametre slik som våpenstyrke, avstand, sprengningshøyde, osv, kunne varieres for å se hvordan dette innvirket på resultatet. Eksempler på beregnede verdier for EMP er vist nedenfor for en liten bombe (1 kt) sprengt nær en overflate av godt ledende jord (optimale forhold) i avstand 1 km og 10 km fra nullpunktet (1b). Det ble tatt hensyn til at luften var elektrisk ledende (stor avhengighet av tid, sted og felt). Regnetiden var flere dager på CDC 6600, datidens sterkeste maskin.



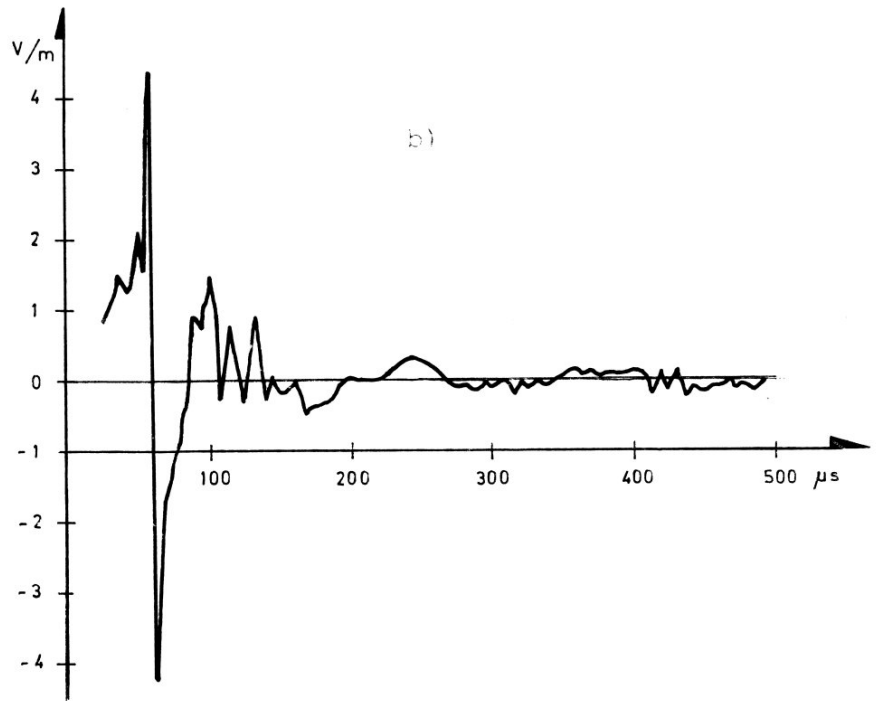
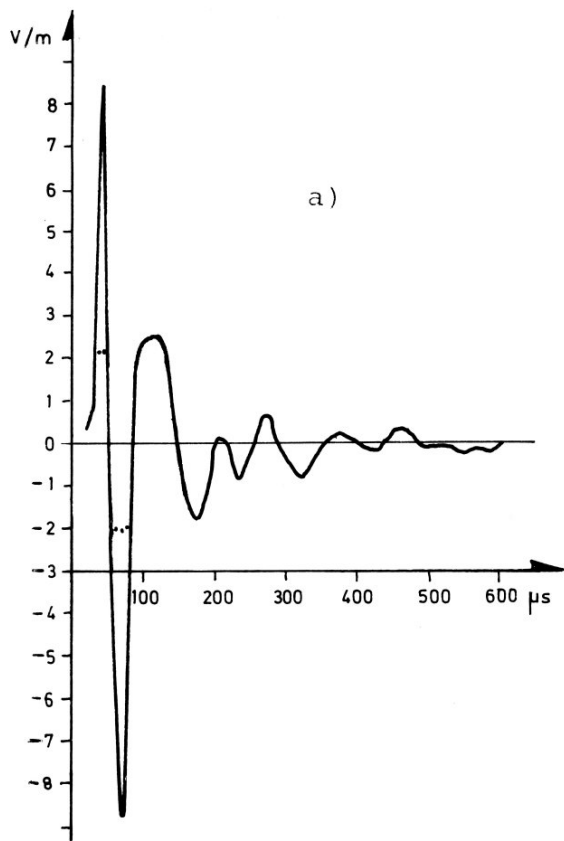
Beregning av EMP fra liten eksplosjon i avstand 1 og 10 km fra nullpunktet (1b).

Ekspløsjoner i stor høyde

Ekspløsjoner i høyder på over anslagsvis 50 km har vist seg å gi EMP-virkninger i store avstander fra eksplosjonsstedet. Det opptrer også langvarige forstyrrelser av jordens magnetfelt (37). Kjernestrålingen fra eksplosjoner i stor høyde får liten svekking og kan ødelegge elektronikk i satellitter og andre objekter i rommet i meget store avstander der det er fri sikt.

En regner med at det kan opptre EMP-felt med amplitude på opptil 50 kV/m over store områder av jordoverflaten (24). Pulsen er kortvarig og varigheten øker bl a med avstanden til observasjonspunktet. Begrensningen i rekkevidde for de mest intense felt er gitt ved de steder der en linje fra eksplosjonspunktet tangerer jordens overflate. Rekkevidden øker derfor med eksplosjonens høyde. En høyde på f eks 100 km gir en rekkevidde på ca 1200 km, mens en høyde på 400 km gir en rekkevidde på ca 2200 km. Ved avstander som er større enn denne begrensning kommer pulsene fram p g a jordbølgeutbredelse og refleksjoner fra ionosfæren. Pulsene er derfor sterkt redusert i amplitude. De største felt opptrer syd for fra eksplosjonen der den elektriske feltvektor er horisontal. Størst styrke opptrer i en avstand fra nullpunktet på ca. 1,5 x eksplosjonshøyden. I østlig og vestlig retning er det en vertikalkomponent av ca 1/3 av denne styrke

Målinger i en avstand på ca 5400 km er vist i figuren nedenfor. EMP ble målt i England 13000 km borte (38). En eksplosjon over Johnston-Øya av tilsvarende styrke i en høyde på 43 km (Orange) ga en vesentlig mindre EMP ved måling i England (38).



Registrering av EMP i en avstand på ca 5400 km fra eksplosjoner i stor høyde (38) (39)

Registreringene er gjort i California av eksplosjoner over Johnston-øya i 1962.

a) Starfish 1,45 Mt, 400 km høyde (9 juli 1962).

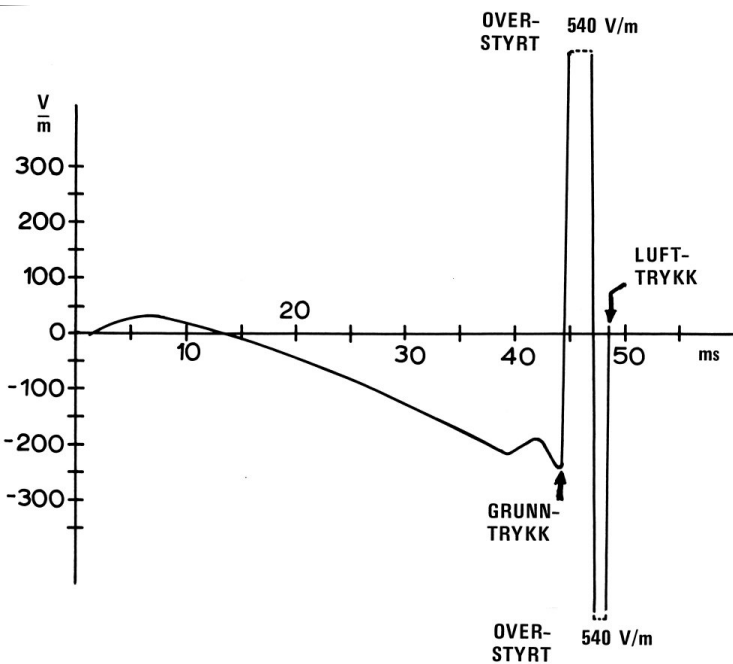
b) Kingfish, 0,2-0,4 Mt, 100 km høyde (1 nov. 1962). Båndbredde av registrerende instrument: 0,5-500 kHz

EKSPLOSJONER UNDER BAKKEN

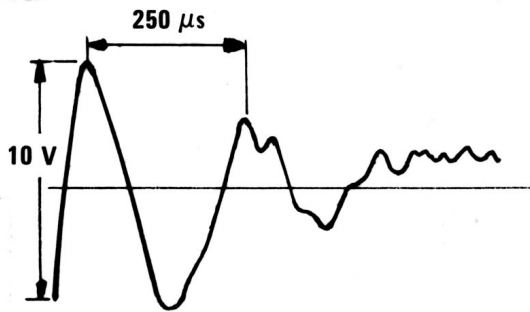
EMP fra eksplosjoner under bakken har bare vært registrert i korte avstander, under 30 km fra nullpunktet (40). Det kan imidlertid opptre intense strømmer i bakken rundt eksplosjonen. Det er rapportert at bla elektriske trykkfølere er brent i stykker nær eksplosjonspunktet p g a EMP (41).

KONVENSJONELLE EKSPLOSJONER

En er ikke kjent med at det har oppstått noen form for skadevirkninger p g a EMP fra konvensjonelle sprengninger. EMP har vært målt like ved eksplosjoner ved flere anledninger, og en mener at det kan opptre meget sterke elektriske felt inne i ildkulen (42). Noen hevder å ha fått støt ved å ta i tennledningen etter eksplosjonen. EMP med en elektrisk feltstyrke på ca. 250 V/m er blitt registrert 100 m fra en overflatesprengning på 500 tonn (42). Etter ca. 43 ms kom et jordskjelv (grunntrykk) som forstyrret det registrerende instrument.



EMP har også vært målt i en avstand av 180 km fra 78 kg TNT i 240 m høyde (44):



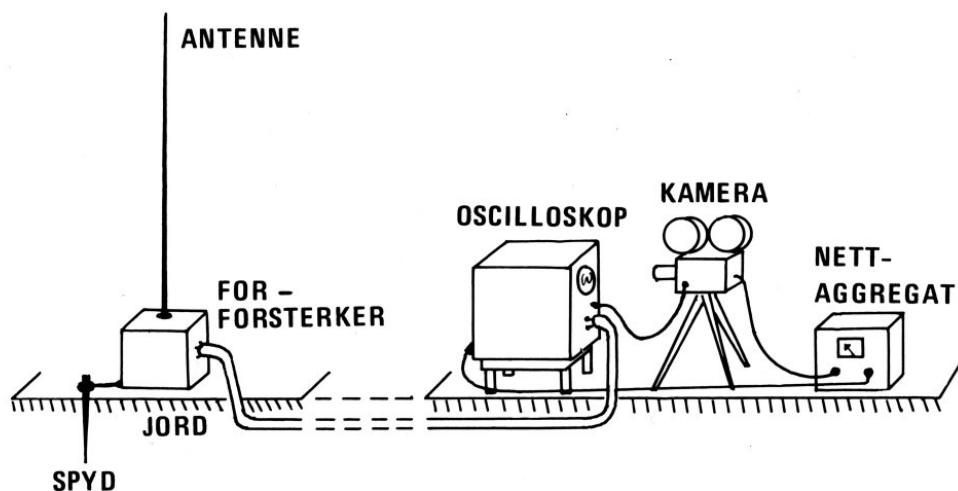
Utstyr for måling av EMP

EMP har hatt stor betydning for deteksjon av kjerneeksplosjoner. Således opprettet amerikanerne et verdensomspennende nettverk av stasjoner for å detektere EMP i frekvensområdet VLF (10-30 kHz) (45). Ved full følsomhet var nettverket i stand til å detektere alle lyn som fant sted over det euroaseatiske kontinent. Av og til måtte imidlertid følsomheten reduseres på grunn av meget høy lynaktivitet (39). Som vist tidligere bør triggernivået være under 50 mV/m for å kunne detektere bakkeeksplosjoner i meget store avstander. For luftsprenninger kan feltstyrken bli bare en tiendedel av dette slik at rekkevidden for deteksjon blir redusert. Skal en bare detektere eksplosjoner i store høyder, kan triggernivået være vesentlig høyere. EMP kan ved slike eksplosjoner detekteres etter flere omløp rundt jorden (45).

En forenklet tegning av et typisk anlegg for måling av EMP er vist nedenfor. Antennen kan bestå av en vertikal metallstang montert over bakken. Den elektriske ledningsevnen av bakken må være så høy som mulig (fuktig jord) og terrenget i området rundt antennen flatt. Den elektriske høyde av en ubelastet antenne blir da ca halvparten av den største fysiske høyde over bakken. Med en antennelengde på 2 m blir dermed antennespenningen i volt like stor som feltstyrken i volt/meter. Antennen er koplet til en forsterker som har høy motstand på inngangen (> 10 Mohm). Dette ble oppnådd ved bruk av en katodefølger. I nyere tid kan felteffekt-transistorer benyttes. Forsterkeren må jordes med ledere i vifteform til flere spyd i bakken rundt forsterkeren. Signalet fra forsterkeren føres videre via en koaksialkabel til registreringsutstyret. Denne kabel bør være gravet ned i bakken. Registreringsutstyret består hovedsakelig av ett eller flere oscilloskop der skjermen blir fotografert automatisk av

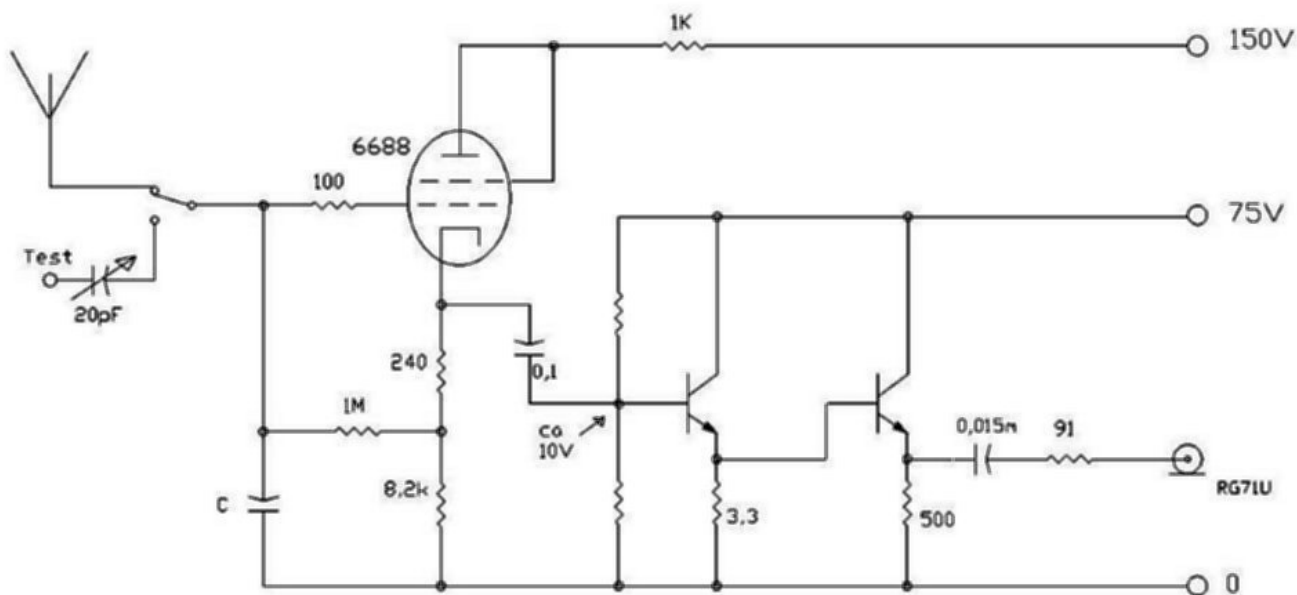
et 35 mm kamera hver gang oscilloskopet registrerer en puls. Det er nå mulig å få utstyr som lagrer slike målinger digitalt. Kraftforsyningsutstyr og annet nettutstyr må være anbrakt så langt som mulig unna antennen (minst 50 m) og være grundig jordnet til bakken.

For montering i fly ble det benyttet en 2,5 m lang antenne montert langs flykroppen i en avstand av ca 0,5 m. Den elektriske høyde (ubelastet) ble da ca 0,5 m.



Utstyr for måling av EMP (prinsipp)

En forsterker vil ha en bestemt kapasitet (CI) på inngangen mot jord. Denne blir summen av den naturlige inngangskapasiteten på forsterkeren og en fast kondensator av hensiktsmessig størrelse. Antennespenningen reduseres dermed med faktoren $(CI + CA)/CA$. Med en 2 m lang antenne er f eks antennekapasiteten $CA = 22 \text{ pF}$. Med $CI = 200 \text{ pF}$ blir reduksjonen en faktor 10. Nedenfor er vist et eksempel på en forforsterker som ble utviklet i 60-årene ved University of Denver. Det er nødvendig å kalibrere utstyret jevnlig. Til det ble det benyttet en generator som ga en puls av kjent størrelse. Ved hjelp av en trimmekondensator blir det mulig å stille inn utgangskapasiteten til generatoren av samme størrelse som antennens kapasitet. Emmitterfølger gir en lav utgangsimpedans til koaksialkabelen som tilkobles oscilloskopet. Allerede i 50-årene kom et egnet oscilloskop Tektronix 513 med høy intensitet, 10 MHz, og forsinkelseslinje.



For målinger i avstander fra eksplosjoner på anslagsvis 10-1000 km bør båndbredden av oscilloskop og forsterkere være minst 500 Hz - 10 MHz. Følsomheten av utstyret innstilles slik at en kan måle feltstyrker i området 1-1000 V/m. Engelske forskere som også målte EMP fra sprengninger i 50-årene laget oscilloskop der utslaget i vertikalretningen på skjermen øket logaritmisk med spenningen. En oppnådde dermed et stort måleområde for feltstyrken ved bruk av bare ett oscilloskop.

For måling i meget store avstander (> 1000 km) kan båndbredden av utstyret reduseres til 1-100 kHz. Høyden av antennen og forsterkningen i utstyret må økes slik at en kan registrere feltstyrker i området 10 mV/m til 1 V/m. Beskrivelser av slikt utstyr kan f eks finnes i (3, 6, 45-48). I tillegg til dette registreringsutstyret var det vanlig å benytte utstyr med to rammeantenner som er montert vertikalt i rett vinkel til hverandre. De to rammeantennene koples til hvert sitt sett med avbøyningsplater i et katodestrålerør via forsterkere. EMP vil da gi et utslag fra senteret av skjermen på røret. Ved riktige justeringer blir retningen av utslaget lik retningen til eksplosjonen. I områder der terrenget er flatt og bakken er godt ledende, er det mulig å få en nøyaktighet i retningsbestemmelsen på $\pm 2^\circ$. Ved terrengforhold som er typiske for Norge, kan feilen i målingen bli stor. En kan da benytte andre systemer som måler ankomsttider for EMP i minst tre separerte punkter på bakken.

Utstyr for registrering av EMP ble også utviklet i 60-årene i USA for bruk i satellitter under prosjekt Vela. Dette utstyret var egnet til å detektere EMP fra kjerneeksplosjoner i atmosfæren (49). Dette utstyret detekterte en sprengning utenfor Sør Afrika i 1979 som det har knyttet seg store usikkerheter til.

Utstyr for automatisk varsling av kjerneeksplosjoner

Sprenging av kjernevåpen nær jordoverflaten gir opphav til radioaktivt nedfall som kan være dødelig for en ubeskyttet befolkning i avstander på flere hundre kilometer. Værforhold, særlig vindretninger, spiller en avgjørende rolle for spredning av disse partikler. For å kunne utarbeide forvarsel til befolkningen, er det viktig at eksplosjonen ble detektert og lokalisert så hurtig som mulig. En kan da søke beskyttelse i tide mot radioaktivt nedfall eller andre skadevirkninger som f eks flodbølger.

AVSLUTNING

I litteraturen fremgår det at forskjellige former for EMP har ført til skade av kabler og utstyr. Det er mulig å forhindre slike skadevirkninger, og enkle tiltak kan gi god beskyttelse. Dersom beskyttelsen blir tatt med på et tidlig stadium i produktutvikling eller prosjektering medfører den små ekstra omkostninger (27).

EMP blir benyttet for fjernregistrering av lyn og dette er nødvendig for å sikre elektrisitetsforsyningen i Norge. Overvåking av EMP fra kjerneeksplosjoner over bakken er viktig for å kontrollere at prøvestansavtalen (1963) blir overholdt. Det er da mulig å få tilnærmede opplysninger om sprengningens styrke og beliggenhet.

Litteratur

- (1) Broad, W J - Nuclear Pulse (I), (II), (III), Science Vol 212, p. 1009, p. 1116, p. 1248 (May-June 1981). "Military grapples with the chaos factor", Science Vol 213, p. 1228 (11 Sept 1981).
- (1b) Grønhaug, K L - Elektromagnetisk puls fra kjerneeksplosjoner. Et problem for elektronisk utstyr. Elektronikk Nr. 9, s.18, 1975.
- (2) Berger, K, E Vogelsanger- Photographische Blitzuntersuchungen der Jahre 1955-1965 auf dem Monte San Salvatore, Bull Schweiz Elektrotechn Vereins 14, 599 (1966)
- (3) Cianos, N E, T Pierce - A ground-lightning environment for engineering use, Tech Rept 1, Stanford Research Institute (1972)
- (4) Linfield, R F, C A Samson - Duration and spacing of spheric pulses, Proc IRE 50, 8, 1841, 1841 (1962)
- (5) Taylor, W L - Radiation field characteristics of lightning discharges in the band 1 kHz to 100 kHz, J Res Nat Bur Stand 67D, 539 (1963)

- (6) Taylor, W L - Daytime attenuation rates in the very low frequency band using atmospherics, J Res Nat Bur Stand 64D, 349 (1960)
- (7) Uman, M A, D K McLain - Magnetic field of lightning return stroke, J Geophys Res 74, 6899 (1969)
- (8) Krider, E P - The electric fields produced by lightning stepped leaders, J Geophys Res 82, 951 (1977)
- (9) Kompaneets, A S - Radio emission from an atomic explosion, Soviet Phys, JETP 35, 1076 (1959)
- (10) Glasstone, S .J Dolan - The effects of nuclear weapons, Third edition, US Department of Defense, US Department of Energy (1977)
- (11) Suydam, B R - Early radio flash from a low altitude air burst, LA-4245, Los Alamos Scientific Laboratory (1970). Theobald, J K - Fast electromagnetic signals produced by nuclear explosions in the troposphere, LA-2808, Los Alamos Scientific Lab (1963)
- (12) Lynch, D - EMP from ALECS, The Atom, No 3, p 15 (Los Alamos Sci. Lab., March 1966). Nuclear shots test anti-missile theory, Aviation Week and Space Techn, p 26 (May 7, 1962)
- (13) Hawking, D - Manhattan District History, Project Y, The Los Alamos Project, Vol 1, LAMS-2532, Los Alamos Scientific Lab (1961)
- (14) Inn, E C Y - Air temperature measurements over several surfaces, Operation Teapot, W T - 1149 (1957)
- (15) Greig, A L, H E Pearse - Thermal radiation measurements (Parts I and II), Operation Plumbbob, ITR - 1502 (1958)
- (16) Cohen, EN Dobbs, J J Meszaros, J G Schmidt - Test of french underground personnel shelters, Operation Plumbbob, W T - 1453 (1962), samt W T - 1535 (1961)
- (17) Williamson, R H et al - The effects of a nuclear explosion on commercial communications equipment, Operation Teapot, ITR-1193, Civil Effects Test Group (1955).
Telecommunication lines under atomic blast, Journal UIT No 5, p 131e (May 1956) og NTZ Vol 10, nr. 8 p.392 (1956).
- (18) - DNA EMP awareness course notes, DNA 2772T, Defense Nuclear Agency, Washington DC (1973)
- (19) Abercrombie, S D - Ground based detection of atomic weapons, IEEE Trans NS-10, 254 (1963)
- (20) Shots of the Week, Missiles and Rockets 30 Jul, p 15 (1962)
- (21) Ferrier, J, Y Rocard - Measure du courant électrique total fourni par une explosion nucléaire, Compt Rend 263, 2931, (1961)
- (22) Robertson, J - US seeks answers to A-blast oddity, Electronic News p 22 (30 October 1967):

**WASHINGTON. — The quiet
* predawn in Honolulu in 1961 was
shattered by the simultaneous
pealing of hundreds of burglar
alarms. At the same instant, cir-
cuit breakers on the power lines
started blowing like popcorn.**

Not a cloud in the sky, so lightning could not be blamed. The power company failed to trace any gigantic electrical surge able to blow out virtually the entire system simultaneously.

(* skal være 1962)

The mystery was solved later — then promptly sealed under a “top secret” stamp. The culprit: A high altitude nuclear test burst more than 500 miles away.

Among the many blast, black-out, and radiation effects produced by the bomb was a little known phenomenon — electromagnetic pulse (EMP). The United States had been alerted to EMP a year or so earlier by the unlikely source of the Soviet Union. But little was known until
* the 1961 bomb showed the terrible impact of EMP at even vast distances.

- (23) New York Herald Tribune, European ed, 10 Jul, p 2 (1962):

Electrical Troubles in Hawaii

In Hawaii, burglar alarms and air-raid sirens went off at the time of the blast. A few street lights were extinguished and others lighted. There was no immediate explanation for the electrical malfunctions.

- (24) US Office of Civil Defence - EMP threat and protective measures, TR-61 A, US OCD (1971).
EMP and associated effects on power, communications and command and control systems, JES-107-1M-12-63, Joslyn Electronic Systems (1963)
- (25) Hoerlin, H - US high-altitude test experiences, LA-6405, Los Alamos Scientific Laboratory (1976)
- (26) Vittitoe, C.N. - Did High-Altitude EMP Cause the Hawaiian Streetlight Incident?, Sandia National Laboratories report SAND88-3341, (1989).
- (27) Thoresen, P, K L Grønhaug - EMP, en våpenvirkning som ødelegger elektriske anlegg, Sivilt beredskap 13, Nr 3, p 13 (1970)
- (28) Grønhaug, K L - EMP og EMP-simulatorer, Norsk militært tidsskrift, Nr. 4, s. 165, 1974.
- (29) Vander Lugt, A, R H Mitchel - Signature recognition for nuclear detonations, Optica Acta _16, p 453 (1969)
- (30) Longmire, CL, C E Baum et al - Special joint issue on the nuclear EMP, IEEE Trans AP-26, 1, p 1-187 (1978), IEEE Trans EMC-20, 1, p 1-187 (1978). Longmire, C.L. - *On the Electromagnetic Pulse Produced by Nuclear Explosions*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-26, No. 1, p. 3.
- (31) Uman, M A et al - Lightning induced by thermonuclear detonations, J Geophys Res 77, p 1591 (1972)
- (32) Johler, J R, J C Morgenstern - Propagation of the ground wave electromagnetic signal, Proc IEEE 53, 2043 (1965)
- (33) Johler, J R - Propagation of an electromagnetic pulse from a nuclear burst, IEEE trans AP-15, 256 (1967)
- (34) Jean, A G, J R Wait - The use of electromagnetic signals emitted from nuclear explosions to study long range VLF propagation, J Geophys Res 70, 1258 (1965)
- (35) Price, G H - The electromagnetic pulse from nuclear detonations, Rev Geophys Space Phys 12, 389 (1974)
- (36) Delloue, M J - L'eclair magnetique du test nucleaire du 13 fevrier 1960 a' Reggane, Compt Rend 250, (11), 2536 (1960)
- (37) Croom, D L - VLF radiation from the high altitude nuclear explosions at Johnston Island, August 1958, J Atm Terr Phys 27, 111 (1965)
- (38) Crook, G M et al - Distant electromagnetic observations of the high altitude nuclear detonation of July 9, 1962, J Geophys Res 68, p 1781 (1963).
Vittitoe, C N - Electromagnetic pulse generation from a high-altitude gamma ray source, SC-DC-70-4900, Sandia Laboratories (1970)
- (39) - How radio can plot high altitude nuclear blasts, Electronics 36, p 28, (Jan 11, 1963)
- (40) Zablocki, C J - Electrical transients observed during underground nuclear explosions, J Geophys Res 71, 3523 (1966).
Miller, L W - The electromagnetic pulse from an underground explosion, LA-5056, Los Alamos Sci Lab (1973)
- (41) Olsen, C W - Diagnostic problems related to measurements near underground nuclear detonations, UCRL-73427, Lawrence Livermore Lab (1972)
- (42) Wouters, L F - Implications of EMP from H E detonation, UCRL-72149 Lawrence Radiation Lab (1970)
- (43) Lacoste, M - Effects electromagnetique engendres par les explosions chimiques, Memorial de L'artillerie Francaise 45, 619 (1971).

- (44) Fehr, U - Energy propagation in the lower ionosphere, Geophys Res 74, 868 (1969)
- (45) Turman, B N - Detection of lightning superbolts, J Geophys Res 82, 18, 2566 (1977)
- (46) Tepley, L, et al - Sub ELF geomagnetic fluctuations III, Report 8-08-64-1, AD 444 557, Lockheed Missiles and Space Co (1964)
- (47) Taylor, W L- Radiation field characteristics of lightning discharges in the band 1 kHz to 100 kHz, J Res Nat Bur Stand 67D, 539 (1963)
- (48) Taylor, W L - Daytime attenuation rates in the very low frequency band using atmospherics, J Res Nat Bur Stand 64D, 349 (1960)
- (49) Richmond, B - Vela satellites 9 and 10 - another pair of eyes in the sky, The Atom 6, 4 (July 1969).
Karzas, W J, R Latter - Satellite based detection of the electromagnetic signal, RM-4542, The Rand Corporation (1965).
- (50) Haas, P. H., et al - Operation Plumbbob - Project 6.2 Measurement of the Magnetic Component of the Electromagnetic Field near a Nuclear Detonation, AD 336550, WT.1436, Diamond Ordnance Fuze Labs, Washington 25 DC, 1962

Dette dokument er et sammendrag av gamle artikler og rapporter om EMP.
Karl-Ludvig Grønhaug @ 2007