

PERMAFROSTFUNDERINGER

"CASE-STORY"

Selskabet for Arktisk Teknologi  
Danish Society for Arctic Technology

August 1989

## INDHOLDSFORTEGNELSE

Forord.....	3
Permafrost i relation til funderingsproblemer, Civilingeniør C. Bæk Madsen.....	4
Projektering af pælefundering for KNI-butik i Ilulissat, Grønland, Civilingeniør Niels Uhre.....	11

## FORORD

I forbindelse med Selskabet for Arktisk Teknologi's (SAT) ordinære generalforsamling i 1989 blev der afholdt medlemsmøde om "permafrostfunderinger".

Indlæggene på mødet er redigeret og udgives i dette SAT kompendium.

Foruden de 2 mundtlige indlæg, der er redigeret blev der forevist en videofilm om udførelse af pælefundering. Forevisningen af den omtalte pælefundering blev ledsaget af Direktør K.E. Busk's kommentarer.

Der blev på mødet givet en beskrivelse af permafrost, opståelse og udbredelse. Problemer med fundering på permafrost blev gennemgået, og der blev i den forbindelse peget på mulige funderingssvigt. Geotekniske forundersøgelser med efterfølgende laboratorieforsøg blev gennemgået som relevante tiltag forud for permafrostfunderingen. En generel funderingsundersøgelse blev aktualiseret i en ny KNI-butik i Ilulissat.

Mulige principper for permafrostfunderinger som kan anvendes i det aktuelle projekt blev gennemgået. Ud fra tekniske og økonomiske vurderinger blev den aktuelle metode valgt.

Med venlig hilsen



Thorkild Thomsen

## PERMAFROST I RELATION TIL FUNDERINGSPROBLEMER

Civilingeniør C. Bæk Madsen  
Geoteknisk Institut

### PERMAFROST

Permafrost er den termiske tilstand, der optræder i jord eller klippe, når temperaturen er under  $0^{\circ}\text{C}$  over en periode på mindst 2 vintre og den mellemliggende sommer. Det er altså en ren temperaturdefinition uafhængig af vandindhold eller evt. saltindhold i jorden. Der findes permafrost under ca. 1/5 af jordens overflade, og udbredelsen på den nordlige halvkugle omfatter Canada, Alaska, Sovjetunionen og Kina samt Grønland. For Grønlands vedkommende gælder, at den overvejende del er beliggende i den permanent frosne zone, mens der helt mod syd kun findes sporadisk permafrost efter en overgangszone med diskontinuert permafrost.

Hvor der træffes permafrost, vil overfladetemperaturerne influere på temperaturen i jordlagene, således at man øverst har en aktiv zone og herunder fluktuationer i jordtemperaturen til sædvanligvis 10 a 15 m under terræn, fra hvilken dybde kun egentlige klimaforandringer kan betinge en temperaturændring, det sædvanligvis vil tage århundreder at nå.

Hvis der derimod er tale om menneskelig indgriben, kan ændringerne ske væsentligt hurtigere og dermed bidrage til en ændring i funderingsforholdene. Derfor bør man forud for byggeri ubetinget kontrollere de geotekniske og termiske betingelser i jordlagene, f.eks. gennem kerneboringer med efterfølgende temperaturmålinger. Med specielt boreudstyr kan det lade sig gøre at optage frosne prøver; disse holdes nedkølede under transport og kan derefter anvendes til såvel en alm. beskrivelse og opmåling af evt. islinser samt videregående laboratorieforsøg.

Udfører man boringer i et område med frossen jord, som f.eks. i området for det aktuelle byggeri, får man et boreprofil, der viser at de termiske betingelser er påvirket af et varierende saltindhold ned gennem aflejringerne, således at resultatet er et nedre, saltholdigt lerlag og et øvre for salt udvasket lerlag, øverst med en aktiv zone.

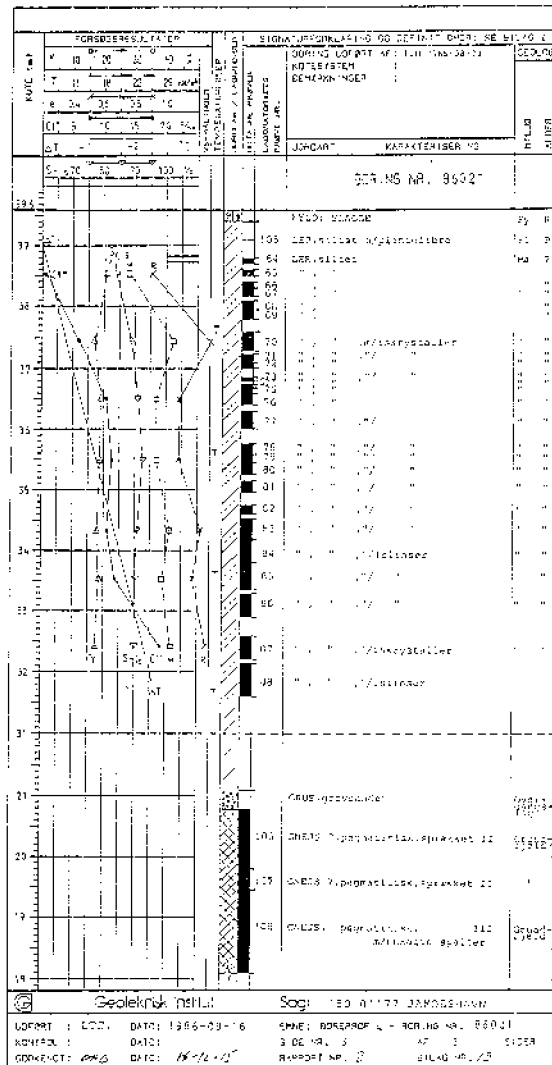


Fig. 1: Boreprofil ved KNI-butik

Man kan således i realiteten komme ud for, at man i de dybere lag har en permafrost (temperatur under  $0^{\circ}\text{C}$ ), der ikke er frosset som følge af en nedsættelse af frysepunktet ved større saltindhold. Dette er forholdet ved det aktuelle projekt, hvor man har et voksende saltindhold med dybden. Der er altså en generel tendens til en med dybden voksende frysepunktssænkning, og der skal således eksempelvis i 5 m dybde have en temperatur på mindre end  $-2^{\circ}\text{C}$ , før jorden er frosset; en vigtig bestanddel at have for øje, når man skal vurdere fundering på varm permafrost.

Problemerne melder sig i det øjeblik, den menneskeskabte ændring i de termiske forhold får jorden til at tø. Specielt i områder med varm permafrost kan problemet hurtigt dukke op.

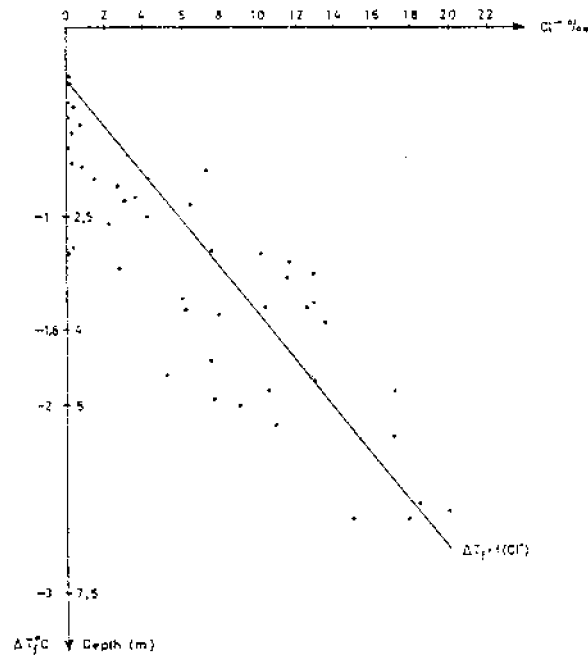


Fig. 2: Frysepunktsætning som funktion af saltindhold (og dybde)

### Sætningsforhold

Anbringer man en frossen lerprøve i et konsolideringsapparat i et kølerum og lader temperaturen stige til over 0°C, får man først en optøningsfase med en betragtelig sætning til følge, inden de egentlige konsoliderings-sætninger indtræder. Som tilgift kan man også få et direkte bidrag fra optøning af islinser.

Såvel i udlandet som i Grønland findes eksempler på skader hidrørende fra optøning; en tidligere KNI-butik i Sisimiut måtte således kondemneres som følge af kraftige sætningsskader.

### Permafrostfundering

Hvad kan man så gøre for at sikre sine bygningsværker? I princippet kan man forestille sig:

- en pælefundering med bibeholdelse af frosten.
- en pælefundering ført til fjeld, evt. med forankring.
- anvendelse af termiske pæle.
- optøning af frosten og normal direkte fundering.
- opbygning og sikring af frosten og direkte fundering.
- frysning af funderingsunderlaget.
- forankring af fundamenter til fjeld.

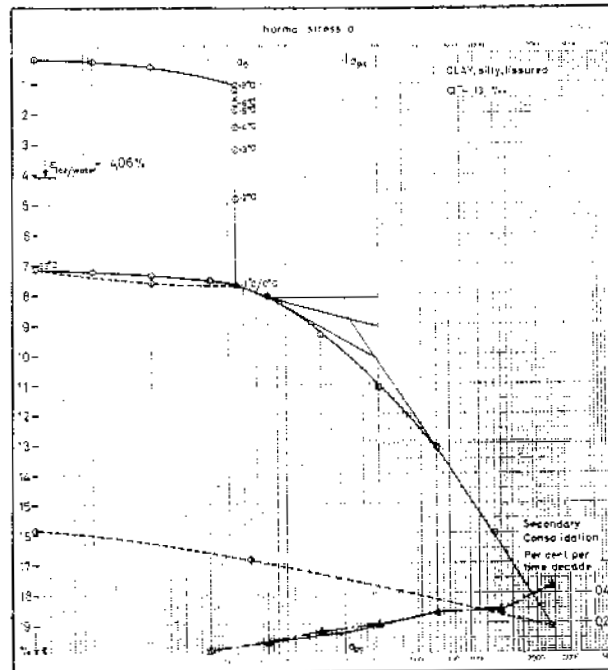


Fig. 3: Konsolideringsforsøg med frossen lerprøve

Pælefundering er en vidt udbredt funderingsmetode, hvor lasten enten overføres som en spidsmodstand til faste lag eller fjeld, som en overflademodstand gennem frysning til den omliggende jord eller måske som adhæsion i tøde lag, hvor permafrosten ikke er for tyk. Pælene kan etableres med en minimum af forstyrrelse af det termiske miljø.

Ved fundering gennem pæle må der drages omsorg for, at de på pælen virkende kræfter ikke forårsager, at disse trækkes op. Pælen placeres i optøede eller forborede huller, og mellemrum mellem pæl og hul fyldes med en siltvælling, der fryser fast og skaber tæt forbindelse. Foroven forsynes pælene mange steder med en betonisation som kraftoverførende led for at mindske varmetransmissionen gennem stålpælen ned i jorden, alternativt kan der anvendes træpæle.

Pælefundering ført til fjeld vil blive omtalt i forbindelse med det konkrete projekt såvel som princippet med at anvende termiske pæle (heat-pipes), der er et selvvirkende og vedligeholdelsesfrit system til sikring mod optøning af permafrossen jord; et system, der blev udviklet i forbindelse med bygning af Alaska pipe-line.

Optøning af permafrostlagene bør i øvrigt så vidt muligt undgås. Ved en god isolering af bygningerne (specielt gulvet) samt en rigelig ventilation med frisk luft mellem bygning og terræn bliver de termiske ændringer i permafrosten i reglen ikke store.

Punktfundering bør foretrækkes for sammenhængende fundamenter, idet sidstnævnte leder forholdsvis meget bygnings- og solvarme ned i jorden. Ved yderligere at lægge en gruspude mellem det oprindelige terræn og huset, kan man endog - til yderligere sikring - opnå at hæve permafrostgrænsen.

Man kan også ad kunstig vej holde jorden frossen, eksempelvis med afkølede rørsystemer under større konstruktioner, der ikke eller kun vanskeligt kan pælefunderes.

### KNI-bygning, Ilulissat

Dette byggeri blev projekteret til udførelse på en slette midt i Ilulissat, et område, der tidligere har været anvendt som landingsplads for helikoptere. I forbindelse med tidligere undersøgelser og de nu foreliggende, er der udført 20 kerneboringer på stedet. Disse boringer viser overraskende store dybder til fjeld, et tiltagende saltindhold med dybden samt finkornede ler- og siltsedimenter uden - eller med ringe - stenindhold.

I forbindelse med temperaturmålinger er der registreret minimumstemperaturer på  $-3$  til  $-4^{\circ}\text{C}$ , men samtidig en frysepunktssænkning, der gør, at temperaturerne snarere svarer til  $-2$  a  $-3^{\circ}\text{C}$  i relation til optøning. Der er altså en latent fare for en senere optøning af den varme permafrost som følge af den termiske ændring, der må forventes at ske efter bygnings opførelse. I tilgift til dette er der fundet iskrystaller og islinseudannelser, således at en optøning må forventes at få katastrofale følger for et direkte funderet byggeri.

I modsætning til tidligere undersøgelser i Ilulissat er der som nævnt på det aktuelle område truffet meget store løsjordsmægtigheder med maksimum på 18,8 m. Ud fra samtlige foreliggende oplysninger er der optegnet niveaukurver for fjeldspejlets beliggenhed, og dette billede viser, at byggeriet strækker sig hen over to dybdepunkter på området.

Ud fra disse registreringer og ud fra vore erfaringer med de aktuelle silt- og leraflejringer i Ilulissat vil der for den frosne ler kunne forventes sætninger svarende til en dekadehældning  $Q \sim 2$  a  $3\%$ . Ved optøning af islinsefri ler må der forventes en sætning på ca.  $4\%$  af lagtykkelsen, og hertil kommer sætninger som følge af mærbelastning af den tøde jord. Ved spændinger ud over en sandsynligvis relativt lav forkonsolidering skal disse sætninger beregnes ud fra en dekadehældning  $Q \sim 15\%$ , og idet der yderligere må forventes et islinseindhold vil sætninger i en tøfase og efterfølgende konsolideringsfase kunne andrage 5 a  $10\%$  svarende til 0,5 a 2 m.



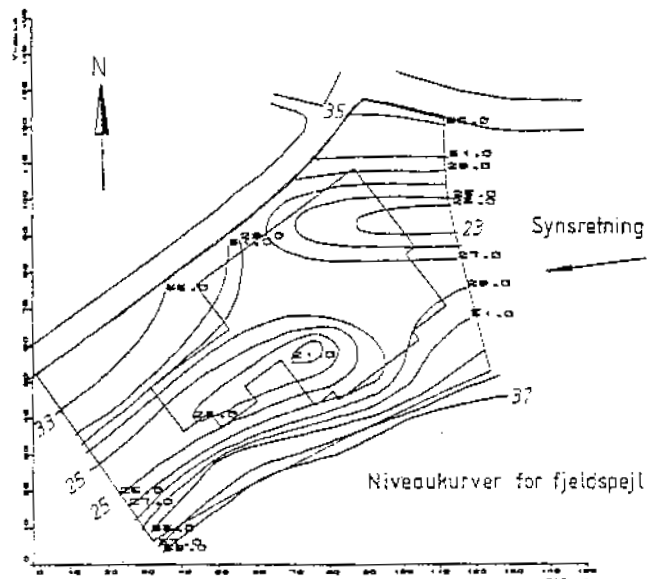


Fig. 4: Digitaliseret billede af fjeldspejlets niveau

Med den potentielle risiko, der ligger for en optøning af jorden ved en normal direkte fundering, vil en sådan - med ovenstående sætningsegenskaber for jorden - ikke kunne anbefales.

Med de registrerede store mægtigheder af løsjorden vil et byggeri på det akutelle område derfor skulle funderes enten ved en pælefundering med pæle fastholdt i fjeldet eller ved en egentlig permafrostfundering; disse aspekter vil blive behandlet i det følgende indlæg.

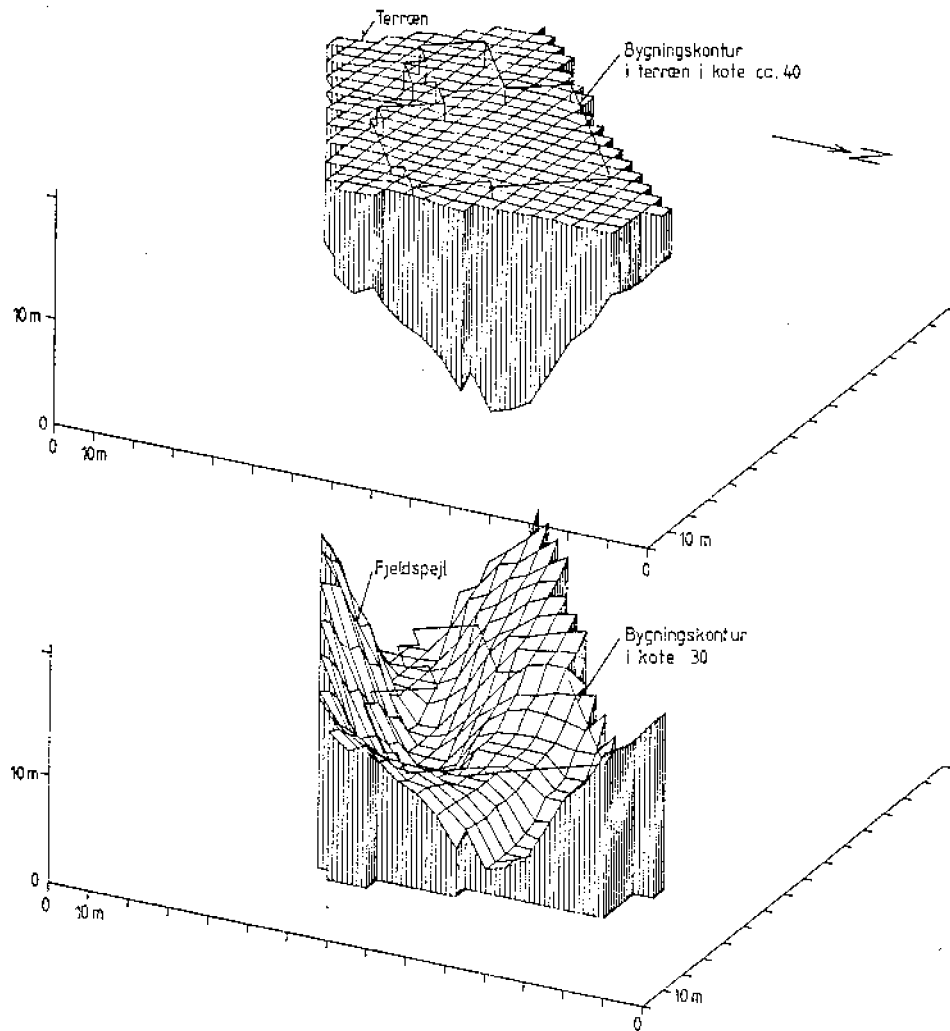


Fig. 5: 3D-model af terræn og fjeldspejl set i den situationsplan viste synsretning

**PROJEKTERING AF PÅLEFUNDERING FOR KNI BUTIK I ILULISSAT**

Civilingeniør Niels Uhre  
Arctic Consulting Group

**PROJEKTERING**

Den aktuelle byggegrund ligger inde i Ilulissat byområde, dvs., den er placeret på et attraktivt sted, hvor befolkningen meget let kan komme hen og købe ind. Alternativet til denne byggegrund var, at man skulle flytte udenfor byen, hvor der kunne findes et fjeldområde af passende karakter, hvor det ville være billigere at bygge, men hvor indbyggerne ville få længere vej.

I første fase bad man om at et bud på, hvor meget merudgifterne ved den specielle fundering på den aktuelle byggegrund ville blive i forhold til en tænkt placering udenfor byen, hvor der var relativt plant fjeld, og hvor der var relativt nemt til vand, kloak og el, og hvor der var vejforbindelse til.

Da Nuna-Tek, henvendte sig, havde man i ingeniørkontoret mod på at undersøge muligheden for at anvende heat pipes (termorør) til denne specielle fundering. Dette ville betyde, at man skulle anvende et princip som det, der blev brugt på olieledningen i Alaska. Olieledningen i Alaska gik som bekendt fra Beauforthavet i nord og hele vejen ned gennem Alaska til Alaskas Golfen i syd. På langt den overvejende del af strækningen anvendte man et funderingsprincip, som ses på figur 1.

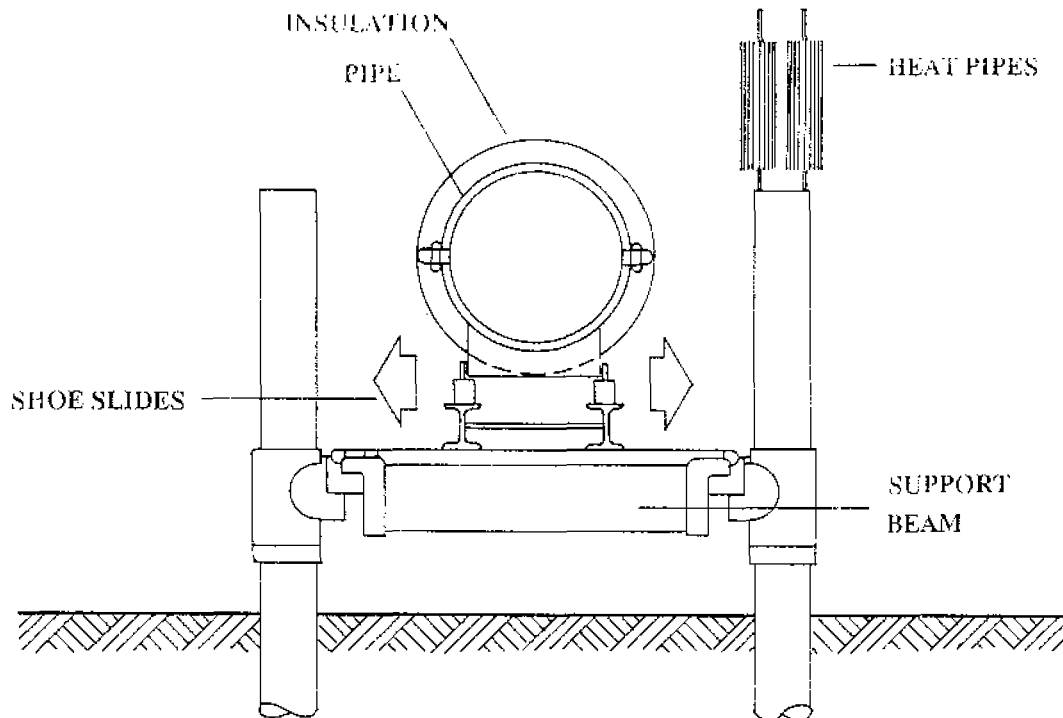


Fig. 1: Pipeline

Langs hver af de to understøtninger er der ført to termorør ned i jorden. På understøtningen til venstre er radiatorindretningen ikke medtaget foroven. På figur 2 kan vi se, hvorledes en understøtning er udført i lidt større målestok. Termorøret er vist med radiatorindretningen foroven og med rørføringen helt ned til bunden af understøtningen. Princippet er som bekendt, at man fylder vandfri ammoniak i røret, som på grund af fordampningen er i stand til at tage varme fra jorden nede ved bunden og føre den op til den koldere luft oppe omkring radiatorrøret. Varmetransporten foregår om vinteren, når luften er kold, og går i stå om sommeren, når luften er varmere og jorden nede ved bunden.

Kontakt med et rådgivende firma i Alaska, som var ekspert på netop denne måde at fundere på, oplyste at den oprindelige fabrik, som producerede de 120.000 termorør til Alaska-ledningen, var nedlagt, men at man i Alaska havde firmaer, som var eksperter i at producere termorør af tilsvarende slags. Termorør, som var videreudviklet og havde bedre egenskaber end de oprindelig.

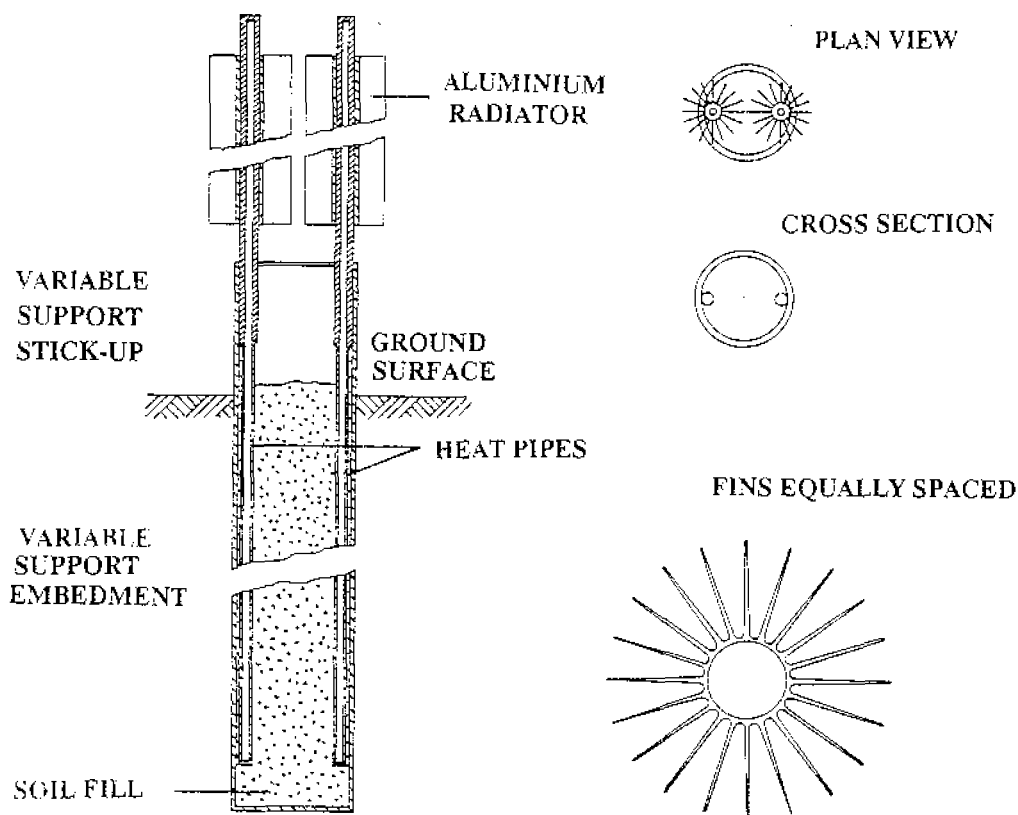


Fig. 2: Transit aluminum radiator

I forslag A er dette princip forsøgt anvendt. Skitsen viser en pælefundering, hvor pælene er ført en passende længde ned i den frosne jord, hvor der er placeret et termorør på begge sider. For at kunne gøre det, er der regnet med at forbore huller, derefter nedsænke pælene og termorørene og til sidst efterfylde med slurry og sikre de øverste 2 m mod opfrysning. Det ses også, at man foroven har lavet et afretningsslag med NFS-materiale, dvs., ikke opfrysningmaterialer. Et af problemerne ved denne løsning må vel siges at være, at når man senere skulle bygge huset ovenpå, ville der være en risiko for, at man kom til at beskadige termorørene.

I forslag B er det samme princip udnyttet på en anden måde, idet der her er anvendt skråtliggende termorør, der har en hældning ind imod midten af bygningen på ca. 1 på 10. Udenfor bygningen er der placeret støttepæle, som fastholder og beskytter termorørene. På grund af hældningen ind mod midten har man måttet regne med at anvende mere grusmateriale. Fordelen ved denne løsning kunne være, at termorørene er mindre udsatte under byggeriet, men til gengæld så står de mere udsat senere, når bygningen skal tages i brug, og udseendemæssigt vil det formentlig også være skæmmende.

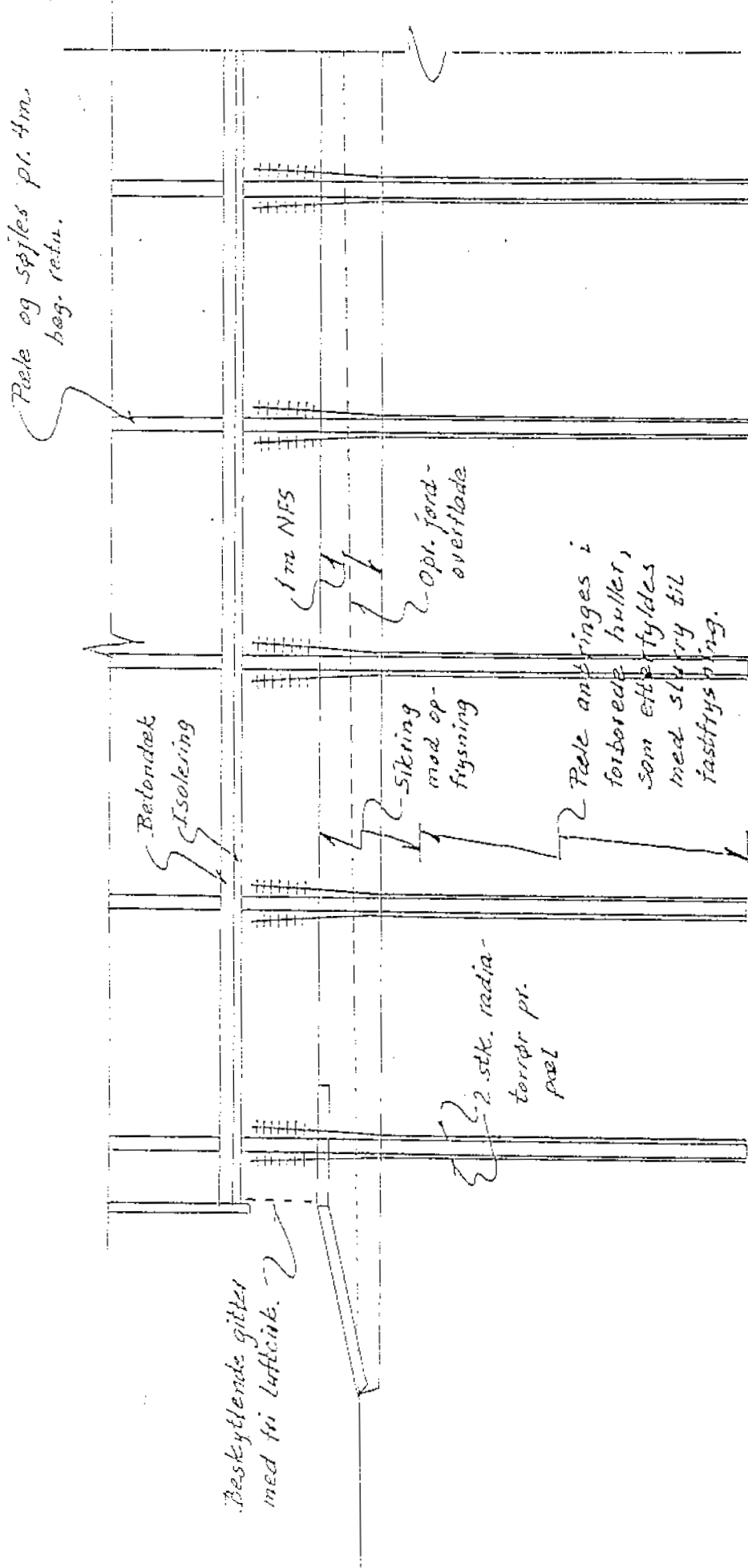
En tredje løsningsmulighed er vist på forslag C, hvor man har anvendt kølerør, og et kølesystem placeret inde i huset. En fordel ved denne løsning er, at huset er placeret direkte oven på jorden, således at man undgår at hæve bygningen og få luft ind under. Denne løsning giver mindre anlægsudgifter, men til gengæld større driftsudgifter under husets brug, og man skal være sikker på, at køleanlægget bliver passet og altid fungerer. Vi kan nævne, at det amerikanske institut CRREL, som beskæftiger sig med research-arbejde i arktiske områder, i dag kan anbefale en sådan løsning med rør udført af plast.

I forslag D er der vist en løsningsmulighed, hvor man har anvendt den kolde luft om vinteren til at sikre permafrostens bevarelse. Denne løsning kræver større forbrug af NFS-materialer, og der er forudsat, at der findes tvungen ventilation om vinteren, dvs., at der løber driftsudgifter på. Fordelene ved denne løsning er, at man kun har ventilationstårne ved hvert hjørne af huset, og at huset kan funderes direkte på jorden.

Til slut er der på forslag E vist den løsning, som man bestemte sig for at anvende. Løsningen er baseret på jernbetonpæle ført ned til fast fjeld. Der er tidligere brugt at optø jorden lokalt med damp og derefter ramme pæle ned til en passende dybde uden at nå fjeld. Her er anvendt forborede huller ned til fjeld, hvor pælene er sænket ned og derefter udfyldt med slurry omkring for at få dem fastfrosset. I det første forslag var det forudsat, at pælene skulle udføres med et hul ned igennem midten, således at man via pælen kunne bore ned i fjeldet og derefter faststøbe en lang dorn i fjeldet og i selve pælen. Derved skulle man sikre mod udskridning og optrækning af pælen.

Bygherren var positiv over for denne løsning, idet han mente, at den ikke indebar eksperimentering med nye metoder, som først skulle til at udvikles. Omvendt var afstanden ned til fjeld ca. 18-20 m, hvor der var dybest, hvilket medførte, at der måtte udføres en gennemgang med erfarne pæle- og boreentreprenører for at være sikker på, at alle fuldt og helt turde gå ind for den pågældende løsning. Sammen med Geoteknisk Institut, myndighederne i Nuna-Tek og erfarne entreprenører blev detaljerne gennemgået. Man valgte at forbore med jordbor ned til fjeld, derefter udskifte til fjeldbor for passende nedboring i fjeldet og afretning. Samtidig valgte man at beskytte pælen foroven mod opfrysning. Da pælene ville blive ført ned til fast fjeld, skulle der ikke være risiko for lodrette sætninger. Beregningsmæssigt måtte det eftervises, at pælene blev stabile i sidderetningen i kraft af en effektiv tilbagefrysning. For at opnå dette, måtte der stilles krav til afstanden mellem pæle, til en effektiv slurryfyldning, og til en passende tilbagefrysningstid.

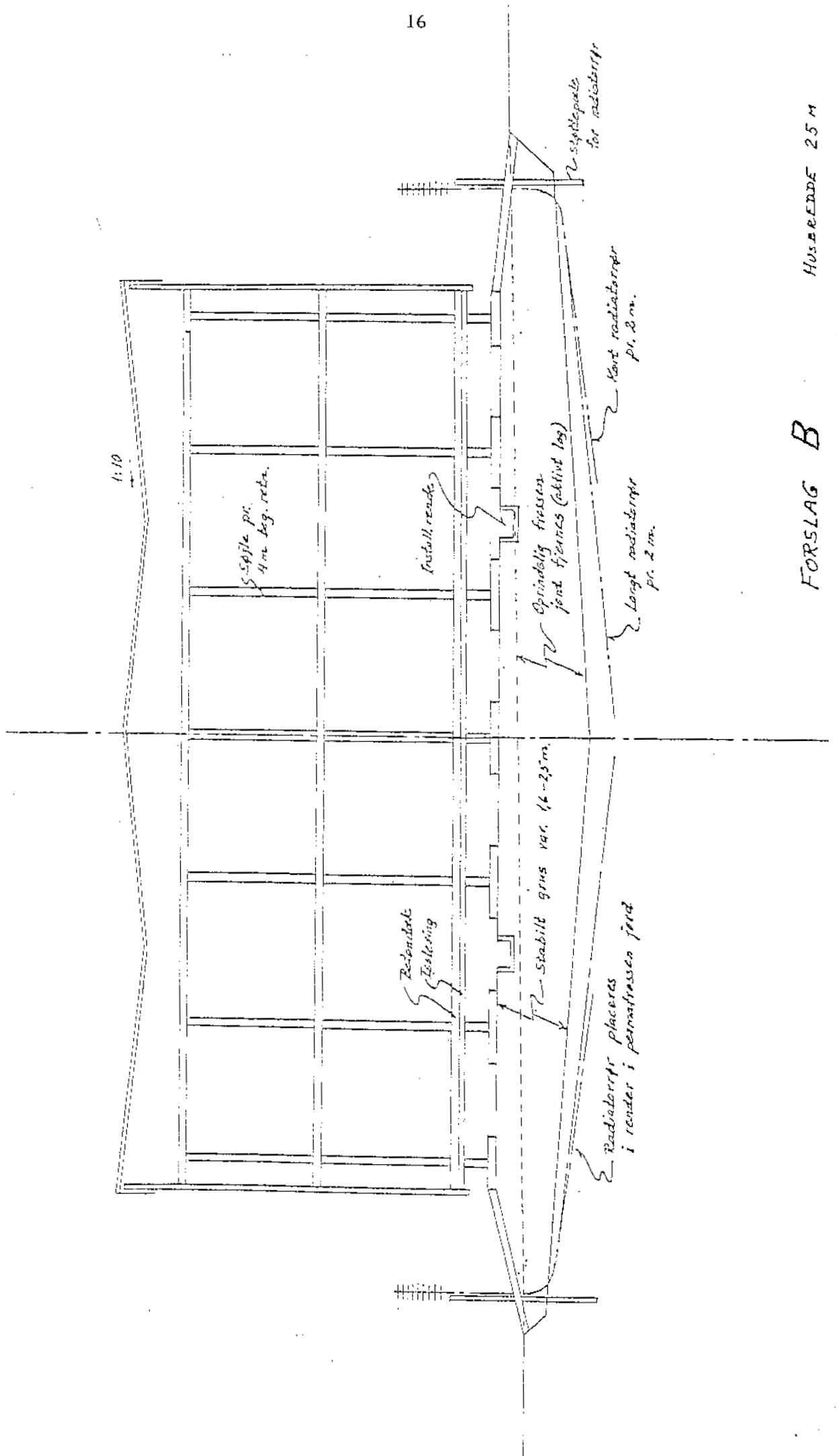
Selve arbejdet blev udbudt i totalentreprise. Entreprenørens kontrolplan skulle sikre, at pælestyrke, pælehåndtering, pælenes retlinethed, hullernes retlinethed skulle være i orden. Desuden, at hullerne skulle være lodrette, og at der blev foretaget effektiv boring i fjeld, oprensning af hullet, kontrol med slurry og med tidspunktet for pælekapping.



Husbredde  $\geq 25$  m

FORSLAG A

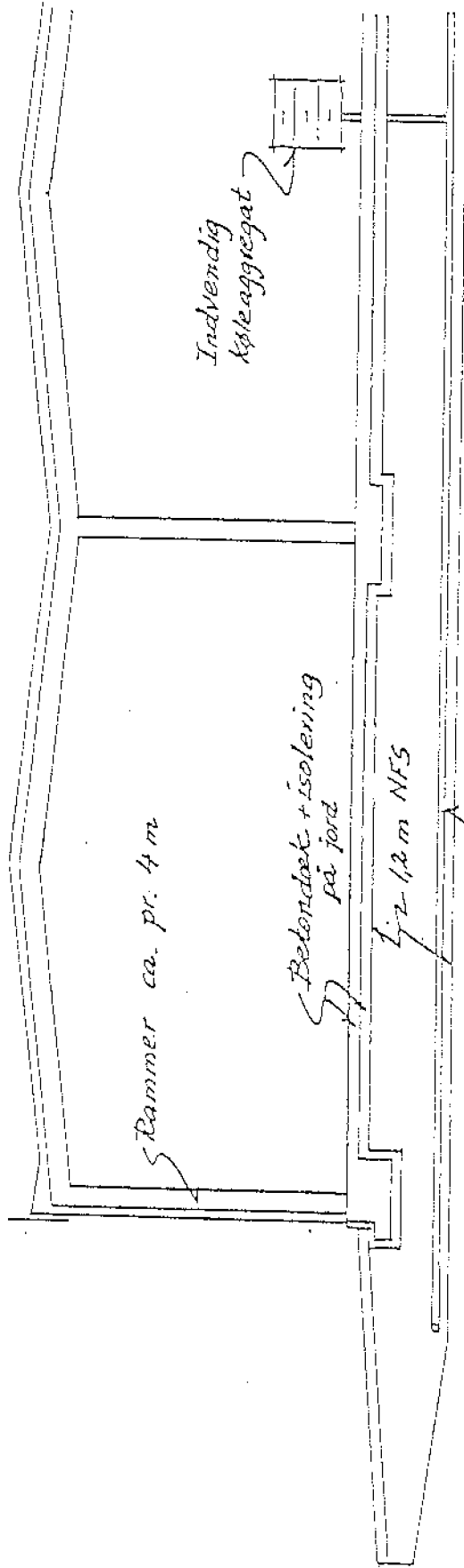
N.H. 28/2 86



FORSLAG B HUSREDE 25 M

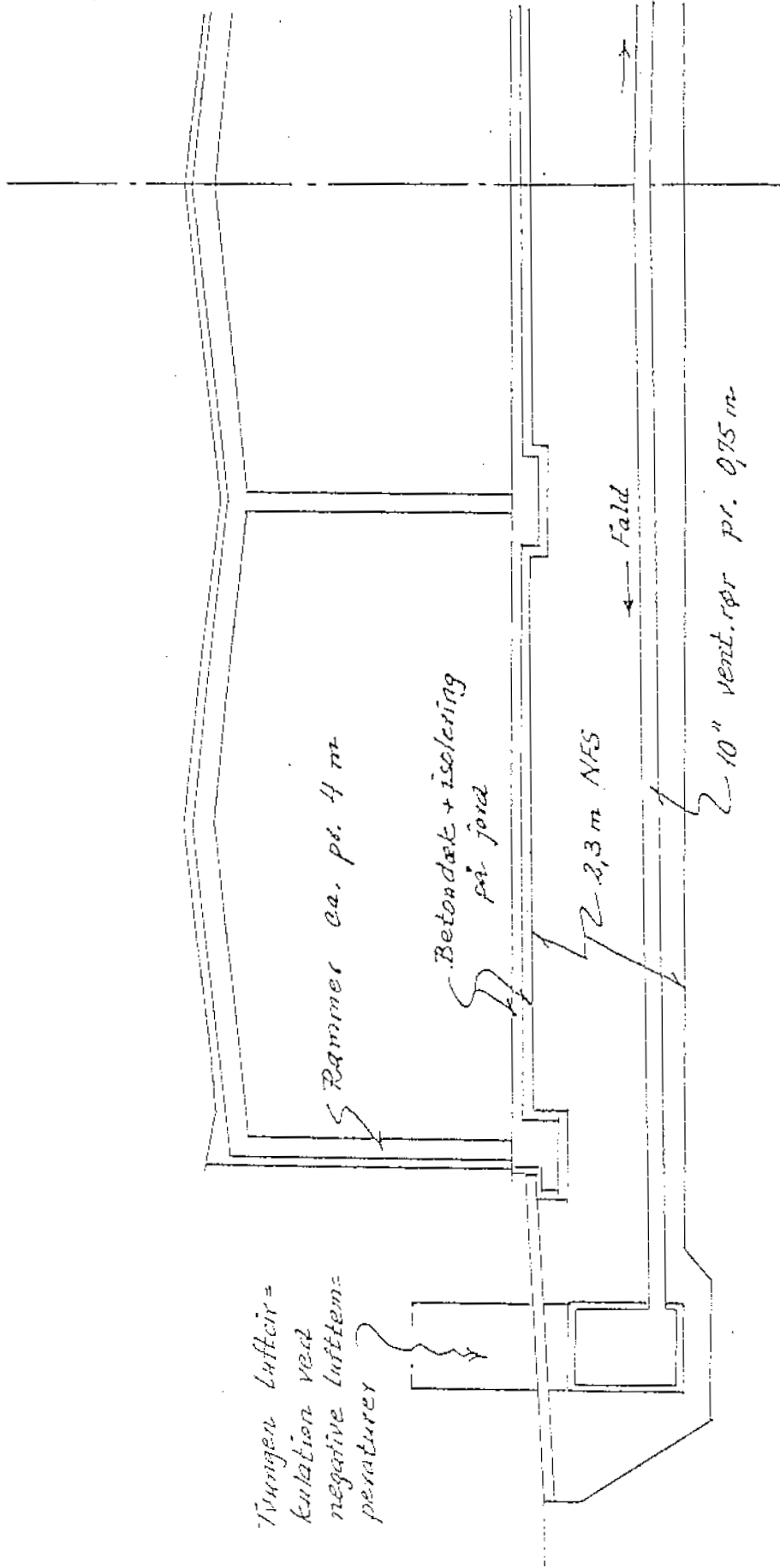
NU 1/2 16





FORSLAG C

Husbredde  $\geq 25$  m



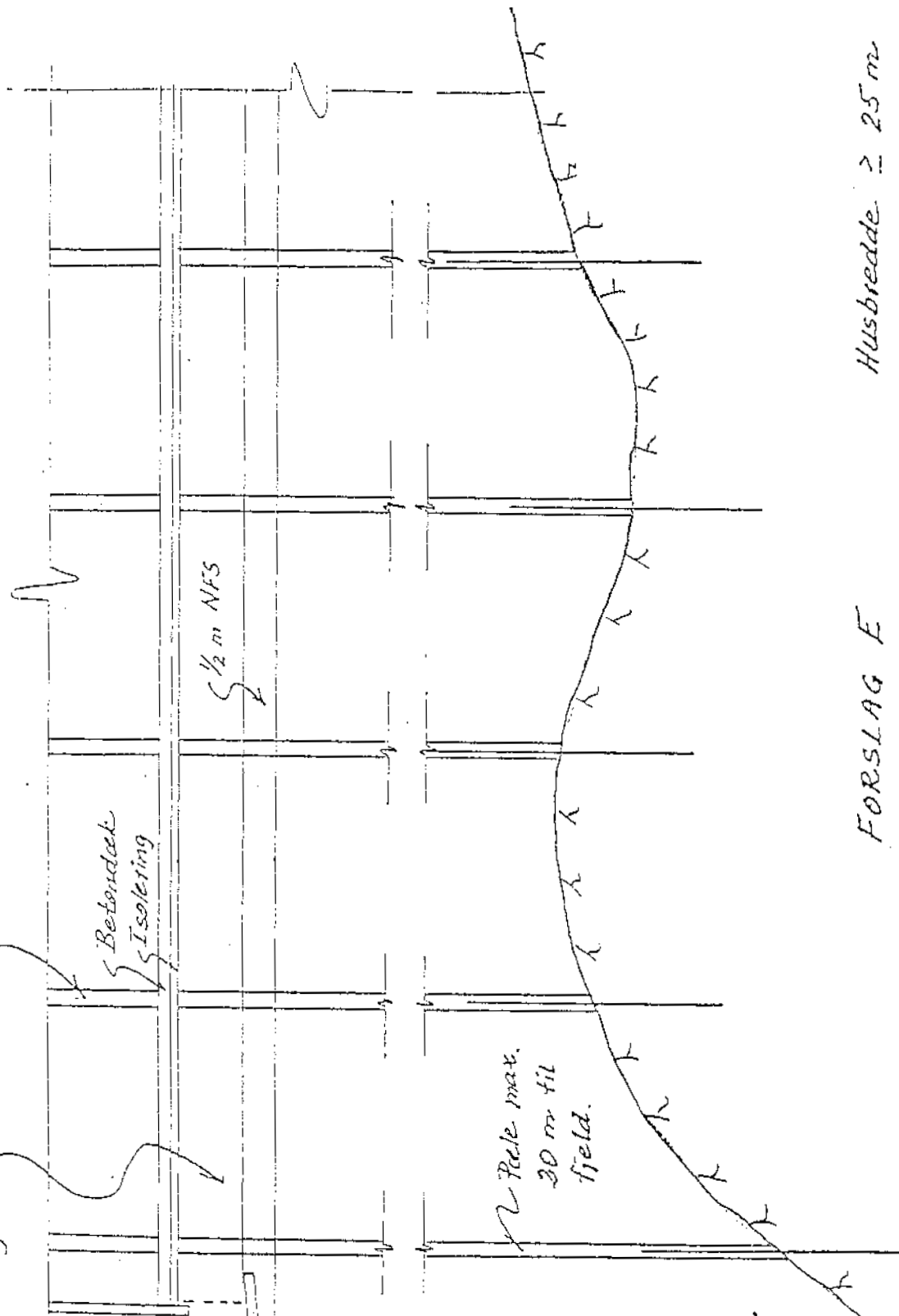
Husbredde  $\leq 30$  m

FORSLAG D

NH. 30/9 97

Luftcirkulation for  
at hindre optørring  
og efterfølgende for-  
ringet pæleindsprengning.

Pæle og søjler ca. pr. 4 m  
beg. røtr.



Huller forbores til  
fjeld med  $d = 0,28 m$ .

Betonpæle  $\approx 0,25 m$   
rammes til fjeld.

Pælene er forsynede  
med rør  $d = 3''$ .  
Der bores 2 m i fjeld  
gennem 1 pr. kamstål  
 $\phi 25$  faststøbes. Til  
kamjern er svejst  
 $\phi 12$  i fuld pælelængde.  
Der tilstøbes om  $\phi 12$ .

Faststøbte kamjern  
+ bygningsvægt hin-  
des oplysning af  
pæle.

FORSLAG E

Husbredde  $\geq 25 m$