

BTO 2004.043
september 2004

Cryogeen boren van putten

Inventarisatie van technische aspecten en
toepassingsmogelijkheden



BTO 2004.043
september 2004

Cryogeen boren van putten

Inventarisatie van technische aspecten en
toepassingsmogelijkheden

© 2004 Kiwa N.V.
Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag
worden verveelvoudigd,
opgeslagen in een
geautomatiseerd
gegevensbestand, of
openbaar gemaakt, in enige
vorm of op enige wijze,
hetzij elektronisch,
mechanisch, door
fotokopieën, opnamen, of
enig andere manier, zonder
voorafgaande schriftelijke
toestemming van de
uitgever.

Opdrachtgever
BTO

Projectnummer
11.1456.404

Kiwa N.V.
Water Research
Groningenhaven 7
Postbus 1072
3430 BB Nieuwegein

Telefoon 030 60 69 511
Fax 030 60 61 165
Internet www.kiwa.nl

Colofon

Titel

Cryogeen boren van putten

Projectnummer

11.1456.404

Projectmanager

Jan Willem Kooiman

Kwaliteitsborger(s)

Kees Vink

Auteur(s)

Gijsbert Cirkel

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten en is openbaar

Samenvatting

De leveringszekerheid van de Nederlandse drinkwatervoorziening wordt belemmert door verstopping van pompputten. Immers verstopping reduceert het wateraanbod. Op basis van een eerste inventarisatie is ingeschat dat de Nederlandse drinkwaterbedrijven jaarlijks 12 miljoen euro (prijspeil 2000) besteden aan het opsporen, beheersen en voorkomen van putverstopping (Schrama et. al, 2001). Uit deze inventarisatie blijkt dat bij 2/3 van de verstopte putten er sprake is van verstopping van de boorgatwand. Van conventionele boortechnieken, waarbij een boorspoeling wordt gebruikt, is bekend dat restanten van de boorspoeling op de boorgatwand achterblijven. Op theoretische gronden mag verwacht worden dat deze restanten accumulatie van deeltjes op de boorgatwand (en dus verstopping van deze pompputten) bevorderen.

Tijdens een TRIZ sessie gehouden op 9 oktober 2001 is het idee opgekomen om in plaats van het gebruik van een boorspoeling de grond te bevriezen met bijvoorbeeld zeer koud stikstofgas. De boorgatwand blijft dan ook zonder spoeling stabiel en is tevens waterdicht. Doordat er geen spoeling gebruikt wordt blijft de boorgatwand schoon, waardoor accumulatie van deeltjes kan verminderen.

Om nader te onderzoeken of dit idee een oplossing zou kunnen bieden voor de problemen met boorgatwandverstoppingen bij de waterbedrijven is een projectgroep gevormd met betrokkenen uit de sector. De volgende bedrijven hebben geparticipeerd in deze groep:

- Haitjema (boorbedrijf)
- Bam nbm (boorbedrijf)
- Dura Vermeer (boorbedrijf)
- Hoekloos (industriële gassen en koudetechnieken)

In eerste instantie is de haalbaarheid van vriesboren onderzocht. Hiertoe is literatuuronderzoek gedaan, advies ingewonnen bij de boorbedrijven en onderzoek gedaan naar de technische en economische mogelijkheden en beperkingen van de toepassing van koude gassen in samenwerking met de firma Hoekloos.

Uit het literatuuronderzoek is gebleken dat:

- In de VS tussen 1995 en 1998 (onder de naam cryogenic drilling) veldproeven zijn uitgevoerd, waarbij een conventionele rotary air drilling rig was aangepast voor toediening van stikstofgas. Het gas had daarbij een dubbele functie: bevriezing en transport van losgeboord materiaal. De Amerikaanse veldproeven waren succesvol, maar zowel de diameter als de diepte waren klein in vergelijking met Nederlandse pompputten.
- Op het gebied van langzame vriestechnieken vrij veel ervaring is opgebouwd, op het gebied van snelle bevriezing van grond is echter nog vrijwel geen ervaring.

- toepassing van vriestechnieken die bij de tunnel- en mijnbouw worden gebruikt niet geschikt zijn omdat de bevroingsnelheden hier veel lager kunnen zijn dan nodig voor het boren van een waterwinput.

Vervolgens is in overleg met de leden van de projectgroep nader onderzocht of het toepassen van cryogeen boren technisch en economisch haalbaar kan zijn voor Nederlandse pompputten. Het onderzoek is toegespitst op de volgende onderzoeksvragen:

- welke gasdebieten en drukken zijn nodig voor het boren van diameters en diepten die kenmerkend zijn voor Nederlandse pompputten en zijn deze technisch haalbaar
- wat zijn de kosten van aanpassingen van de boorapparatuur en wat zijn de terugkerende meerkosten van een cryogene boring
- wat is de maximale boorsnelheid en de transportcapaciteit van het gas en hoe ontwikkeld zich de stabiliteit van het boorgat

Conclusies

- Cryogeen boren van putten is technisch haalbaar
- De eenmalige investeringskosten van aanpassing van een boorwagen en gereedschap bedragen globaal 10 - 15k€
- De terugkerende meerkosten (inclusief: stikstof, transport, personeel en installatie) van een cryogene boring ten opzichte van een conventionele boring variëren (afhankelijk van diepte en diameter tussen 2k€ en 5,5 k€ . (grootteorde 4% op de totale kosten voor een put inclusief installatie); bij grotere diameters en/of diepten nemen de kosten sterk toe omdat de benodigde annulaire stroomsnelheden en drukken veel hoger worden en er bijvoorbeeld 's nachts doorgewerkt moet worden (cryogeen boren is een continue proces)
- Berekeningen aan de stabiliteit en boorsnelheid moeten in veldproeven nader getoetst worden
- Cryogeen boren is veelbelovend voor toepassingen buiten de drinkwatersector. Mogelijke toepassingsgebieden zijn:
 - o Milieutechniek
 - o Warmte-koude opslag
 - o Gestuurde boringen
 - o Speciale toepassingen, zoals voor het uitvoeren van geotechnische metingen.

Vervolg

Uitvoering van een veldproef is de volgende stap om uiteindelijk te kunnen vaststellen of de techniek daadwerkelijk het optreden van verstopping van de boorgatwand kan voorkomen of verminderen. Uit ander BTO-onderzoek naar deeltjes in grondwater (Van Beek,2003) blijkt dat mechanische verstopping wellicht beheersbaar is door putschakelen. Er is besloten de resultaten van dit onderzoek af te wachten, alvorens binnen het BTO het onderzoek naar cryogeen boren te vervolgen. Wel wordt voorgesteld om in 2005 - 2006 in samenwerking met Geodelft, Hoekloos en de betrokken boorbedrijven een praktijkproef op te zetten. Gezien de innovativiteit en brede toepassingsmogelijkheden van de techniek kan voor de financiering overheidssubsidie aangevraagd.

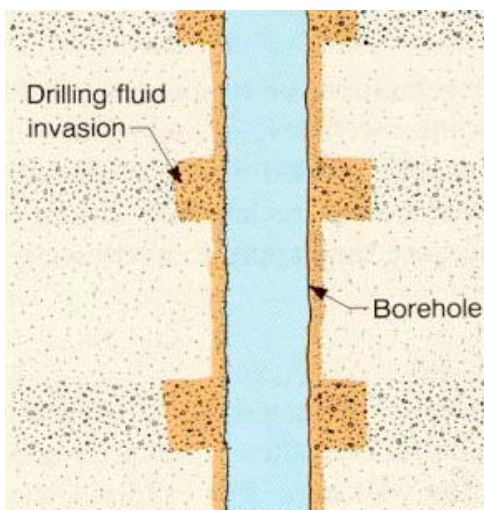
Inhoud

SAMENVATTING	1
INHOUD	3
1 INLEIDING	5
1.1 VERSTOPPING VAN PUTTEN DOOR VERSMERING EN BOORSPOELING.....	5
1.2 HISTORISCHE ACHTERGROND EN ERVARINGEN MET GRONDVRIEZEN	6
1.3 OPZET PROJECT	7
1.4 TOEPASSINGSGEBIED EN VOORDELEN CRYOGEEN BOREN	8
2 TECHNISCHE ASPECTEN BOREN.....	9
2.1 BOORPROCES	9
2.2 AANPASSINGEN AAN DE BOORINSTALLATIE	10
2.3 BENODIGDE SNELHEDEN VOOR TRANSPORT BOORGRUIS	11
3 GEOTECHNISCHE ASPECTEN	13
3.1 GEDRAG BEVROREN GROND.....	13
3.2 DIKTE EN STERKTE BEVROREN RING.....	14
3.3 GROEISNELHEID BEVROREN GRONDRING.....	16
4 KOSTEN.....	19
4.1 ALGEMEEN	19
4.2 INVESTERINGSKOSTEN.....	19
4.3 UITVOERINGSKOSTEN.....	19
5 OPZET PRAKTIJKPROEF	23
6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	25
6.1 CONCLUSIES	25
6.2 AANBEVELINGEN VOOR VERVOLG ONDERZOEK.....	26
LITERATUUR	27
BIJLAGE 1 BENODIGDE VOLUMES.....	28
BIJLAGE 2 ARTIKEL SIMON & COOPER.....	29
BIJLAGE 3 REPORT U.S. DEPARTMENT OF ENERGY	30
BIJLAGE 4 VERSLAG OVERLEG MET HOEKLOOS EN BOORBEDRIJVEN.....	31

1 Inleiding

1.1 Verstopping van putten door versmering en boerspoeeling

In maart 2002 is in het kader van het BTO-project Putmanagement een TRIZ sessie afgerond voor het zoeken naar innovatieve oplossingen voor verstoppende putten [Gras, B., 2002]. Putverstopping treedt op bij ongeveer 2/3 van de Nederlandse pompputten, waarbij 1/3 bestaat uit chemische verstopping en 1/3 uit mechanische verstopping. Mechanische verstopping betreft overwegend een fysisch proces, waarbij de boorgatwand verstopt raakt met in het grondwater zwevende deeltjes. Dit type verstopping treedt vooral op in diepe anaërobe pakketten en bij oevergrondwaterwinningen. Naast het over de tijd (chemisch of mechanisch) verstoppert van putten, blijkt dat sommige putten bij oplevering al een lager debiet halen dan theoretisch mogelijk zou zijn. Een mogelijke oorzaak hiervan is het achterblijven van deeltjes uit het gebruikte werkwater op de boorgatwand.



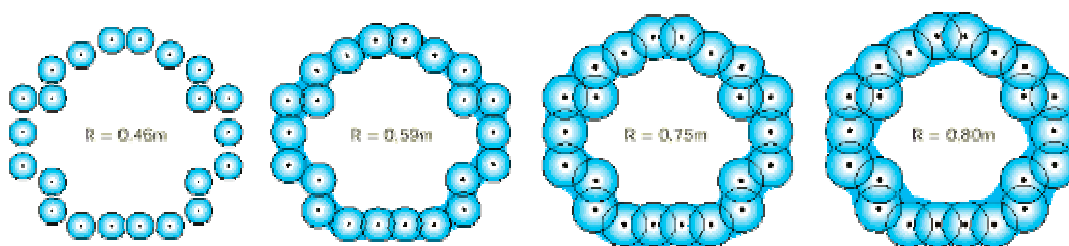
Figuur 1.1 Binnendringen van boerspoeeling in de formatie [Driscoll, 1986]

Bij het boren van putten met bijvoorbeeld de gangbare techniek van roterend zuigboren/luchtliften wordt een boerspoeeling gebruikt. Met de boerspoeeling wordt een overdruk gecreëerd waarmee het boorgat in stand wordt gehouden. De boerspoeeling kan bestaan uit 'natuurlijk' werkwater maar er kunnen ook stoffen zoals bentoniet aan toegevoegd zijn om de wand af te pleisteren. Bij waterbedrijven is men al enige tijd zeer terughoudend met het laten toevoegen van stoffen aan het werkwater. De aan de boerspoeeling toegevoegde stoffen kunnen een moeilijk te verwijderen "film" op de boorgatwand doen ontstaan. Deze "film" kan bij ingebruikneming van de put, de toestroom van water belemmeren. Echter ook bij putten die met een natuurlijke boerspoeeling (dus werkwater zonder toevoegingen) worden geboord kan een "film" ontstaan. In dit geval bestaat de "film" uit deeltjes (o.a. veen en klei) uit de doorboorde formaties die in door de boerspoeeling meegevoerd worden.

Uit de TRIZ sessie van 2002 kwam het idee op om door tijdelijke bevroering van de te doorboren formatie het boorgat stabiel te houden. De tijdelijk bevroren formatie rond het boorgat is waterdicht, waardoor er geen grondwater de put instroomt. De ring bevroren grond krijgt verder een veel grotere stijfheid en kan de druk van de formatie opvangen. Een boorspoeling is hierdoor niet meer nodig, waardoor geen film meer zal ontstaan en ook versmering van de boorgatwand minimaal zal zijn.

1.2 Historische achtergrond en ervaringen met grondvriezen

Het bevroeren van grond voor het maken van tunnels en mijnschachten wordt al sinds het einde van de 19^e eeuw onder de naam AGF (Artificial Ground Freezing) toegepast. De traditionele manier van grondbevroering wordt gerealiseerd door een (zeer) koud gas of vloeistof (stikstof, pekkel) door in de grond aangebrachte vrieslansen te voeren. Vervolgens ontstaat er rond de vrieslansen een lichaam bevroren grond. In figuur 1.2 is de groei van de bevroren grond rond de lansen weergegeven. Als het bevroren grondlichaam voldoende dik is wordt de grond er binnen uitgegraven en kan een tunneldeel of mijnschacht worden geplaatst.



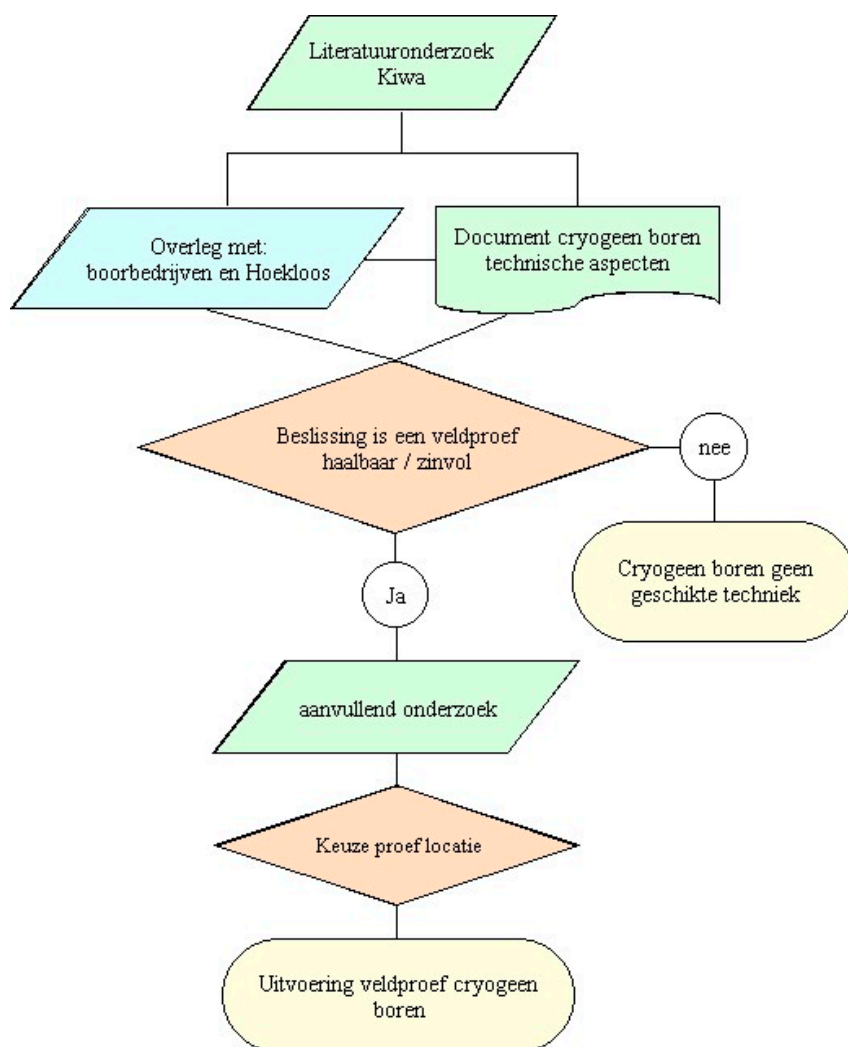
Figuur 1.2 Groei van het ijslichaam rond vrieslansen [COB F100, 2003]

Het bevroeren van grond met vrieslansen is een vrij langzaam proces. Voor tunnel en mijnbouw is dit geen probleem, maar voor het boren van putten zal deze techniek te veel tijd kosten. Verder is het in de grond inbrengen van lansen rond de put vaak niet gewenst. Dit in verband met het doorboren van de formatie dichtbij de put, waardoor bij verwijdering van de lansen kortsluitstroming kan ontstaan. Het risico op microbiologische verontreinigingen kan hierdoor vergroot worden.

In 1998 is in de Verenigde Staten een rapport verschenen van het Department of Energy [Anonymous,1998] waarin de resultaten zijn beschreven van een onderzoek naar de mogelijkheden om grondbevroering toe te passen voor het boren van putten. Uit dit onderzoek is een techniek naar voren gekomen die wellicht ook in Nederland toepasbaar is. Het boren van putten met grondbevroering wordt ook wel cryogeen boren genoemd. Om de toepassingsmogelijkheden van de techniek in Nederland te onderzoeken is een onderzoek opgestart, dat bij voldoende vertrouwen in de methode zal resulteren in een veldproef. In dit document wordt de techniek toegelicht en wordt tevens bepaald waar nader onderzoek nodig is.

1.3 Opzet project

In figuur 1.3 is de opzet van het haalbaarheidsonderzoek naar cryogeen boren weergegeven. Het onderzoek is opgedeeld in twee fasen. De eerste fase bestaat uit een literatuurstudie en overleg met boorbedrijven en Hoekloos. Het resultaat van de literatuurstudie is weergegeven in het document 'Cryogeen boren technische aspecten'. Aan het einde van de eerste fase wordt op basis van de verzamelde kennis de beslissing genomen of cryogeen boren voldoende perspectief biedt. Als blijkt dat er voldoende vertrouwen is om een veldproef op te starten, zal er aanvullend onderzoek plaatsvinden en een proeflocatie worden gekozen. Ten slotte wordt de veldproef uitgevoerd en de ervaringen gepresenteerd in een rapport



Figuur 1.3 Opzet van het haalbaarheidsonderzoek

1.4 Toepassingsgebied en voordelen cryogeen boren

Cryogeen boren van putten heeft verschillende toepassingsgebieden. Mogelijke toepassingsgebieden zijn onder andere: drinkwaterproductie, warmte-koude opslag, saneringstechniek en gestuurde boringen.

In het rapport van het Department of Energy [Anonymous,1998] worden een groot aantal redenen beschreven voor het toepassen van cryogeen boren:

- geen structuurverlies van de formatie rond het boorgat waardoor betere doorlatendheid behouden blijft en minder ontwikkeling van putten nodig is
- geen boorspoeling nodig
- geen verbuizing van het boorgat noodzakelijk
- er kan met een kleinere diameter worden geboord omdat geen verbuizing nodig is
- minder reststoffen (geen boorspoeling, minder verontreinigd formatiemateriaal bij boringen voor saneringsdoeleinden)
- betere bemonstering mogelijk
- in moeilijke formaties is boren beter mogelijk (taaie klei, grote stenen, afwisselend zand, klei en stenen)
- afwerken van het boorgat kan in bevroren toestand gemakkelijker plaatsvinden
- sneller boren waarschijnlijk mogelijk
- slechts minimale aanpassing van standaard booruitrusting nodig
- de methode is uitermate geschikt voor het boren in instabiele onverzadigde formaties en waarschijnlijk ook voor gestuurd boren
- bij saneringen is er een verminderd risico op verspreiden van verontreinigingen naar schone delen van de formaties/aquifers
- Door de extreme koude wordt de kans op microbiologische verontreinigingen sterk verlaagd.

Uit overleg met Nederlandse boorbedrijven bleek dat zij vooral toepassingsmogelijkheden zien in:

- milieutechnische toepassingen waar verspreiding van een verontreiniging dreigt bij klassieke boortechnieken
- speciale toepassingen, zoals het uitvoeren van geotechnische metingen;
- bij boren onder artesische condities
- bij horizontaal gestuurd boren

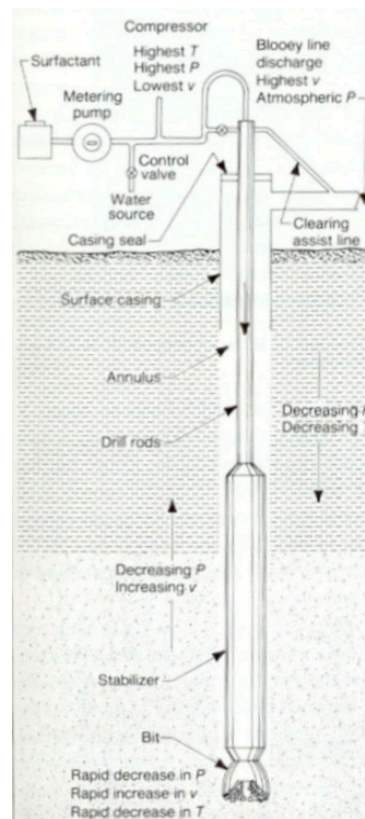
De grootste voordelen van de techniek volgens de boorbedrijven zijn:

- geen werkwater nodig
- steekvaste monsters van de boorspecie

2 Technische aspecten boren

2.1 Boorproces

Het cryogeen boren is vergelijkbaar met een boren in vaste gesteenten. Door het sediment voor de boorkop (rollerbit) te bevriezen zal deze zich gedragen als een vast gesteente. Bij een aantal technieken voor boren in vaste gesteenten (o.a. Rotary dry-air drilling) wordt het boorgruis door middel van lucht verwijderd. Lucht wordt dus als transportmiddel gebruikt. De lucht wordt via de boorstang onder hoge druk naar de boorkop geperst en verlaat de boorkop aan de onderkant (zie figuur 2.1). Door de hoge snelheid neemt de lucht het gruis mee. Via de annulaire ruimte wordt het gruis omhoog gestuwd en aan het maaiveld opgevangen. De maximale dieptes waarbij de techniek toegepast wordt bedraagt ongeveer 300m. De diameters waarbij dry-air drilling in de Verenigde Staten wordt toegepast variëren tussen 9 en 45 cm.



Figuur 2.1 rotary dry-air drilling

Bij cryogeen boren wordt in plaats van lucht, stikstofgas of een stikstofnevel onder hoge druk door de boorstang geperst. De temperatuur van het stikstofgas bedraagt -196 °C waardoor de grond rond de boorkop bevroert en ook de wanden van het boorgat bevroren blijven. De berekening voor de benodigde stikstof-gasdruk verloopt identiek aan de methode voor de berekening van de benodigde luchtdruk. Voor de boring is een pompinstallatie nodig waarmee een heel scala aan temperaturen, drukken en debieten geleverd kan worden. Bij de firma Hoekloos in Schiedam is een dergelijke installatie beschikbaar die voldoet aan de eisen. Met deze installatie zijn er technisch geen beperkingen (maximaal debiet 24000 m³/uur en een maximale druk van 275 bar) voor de stikstoflevering. Om de losgeboorde deeltjes naar het maaiveld te vervoeren is een bepaalde stroomsnelheid nodig in de annulaire ruimte. In de literatuur worden waarden van 15 m/s tot 25 m/s aangehouden. Voor zeer diepe boringen kan de benodigde snelheid oplopen tot 35,5 m/s [Driscoll, 1986].

2.2 Aanpassingen aan de boorinstallatie

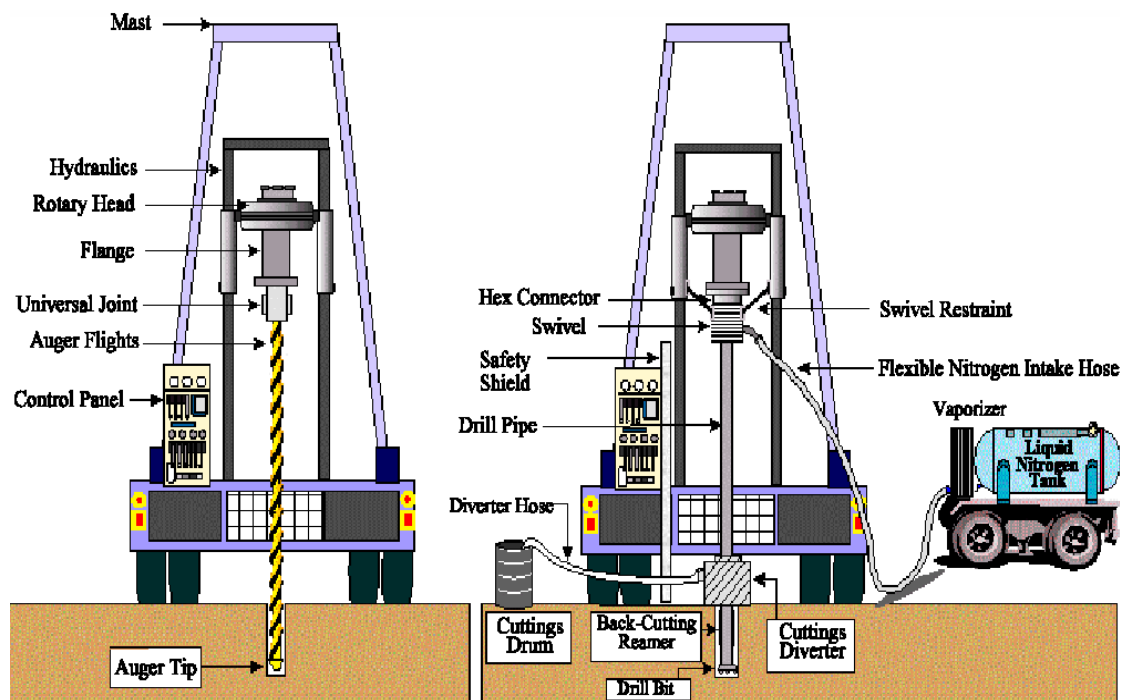
Om cryogeen te kunnen boren zal de standaard boorinstallatie op een aantal punten moeten worden aangepast. Het gaat hierbij om het volgende:

- aanbrengen van een aansluiting op de boorstang om de stikstof onder de draaiboorkop de boorstang in te pompen;
- vervangen van de standaard stalen boorpijpen of alleen de koppelingen door roestvaststaal, messing of een ander materiaal dat minder bros wordt dan staal bij lage temperaturen. (volgens het Department of Energy is dit niet altijd nodig);
- toevoegen van een speciale "aftakker" en koudebestendige buis waarmee het koude gas en het boorgruis kunnen worden weggevoerd van de boorinstallatie;
- aanbrengen van beitels langs de buitenzijde van de boorstang op enige hoogte boven de beitel om het door uitzetting van de bevroren grond kleiner wordende boorgat te ruimen;
- gebruik van koudebestendige smeermiddelen (vliegtuigindustrie)

Bescherming van het boorpersoneel:

- toepassen van een zeil (polycarbonaat 10 mm dik) als scheiding tussen het boorpersoneel en de boorstang
- gebruik van handschoenen, stofbrillen en beschermende kleding is noodzakelijk

In figuur 2.2 zijn de standaard boorinstallatie en de aan cryogeen boren aangepaste installatie naast elkaar weergegeven.



Figuur 2.2 standaard boorinstallatie en aan cryogeen boren aangepaste installatie

2.3 Benodigde snelheden voor transport boorgruis

Door John L'Espoir [2003] wordt eveneens aangeraden bij air drilling een stroomsnelheid te gebruiken van minimaal 15 m/s. Hij raadt bij boren zonder toevoeging van schuim echter een snelheid van 25 m/s aan. Hij geeft tevens eenvoudige vuistregels voor het berekenen van het minimaal benodigde compressor debiet (bij een annulaire stroomsnelheid van 15 m/s).

$$\frac{(D^2 - d^2)}{2} * 0,01667 = Q_{\min}$$

waarin:

D = diameter boorkop (inch)

d = buitendiameter boorstang (inch)

$Q_{\min}$ = minimaal benodigde debiet compressor (m³/sec)

De actuele opwaardse (annulaire) stroomsnelheid kan als volgt worden berekend:

$$\frac{Q_{\text{compr}}}{Q_{\min}} * 15 = v_{\text{up}}$$

waarin:

Q_{compr} = actuele debiet compressor (m³/sec)

$Q_{\min}$ = minimale debiet compressor (m³/sec)

v_{up} = actuele opwaardse stroomsnelheid (m/sec)



Figuur 2.3 De losgeboorde deeltjes worden het boorgat uitgeblazen

De benodigde hoeveelheid gas is direct gerelateerd aan de diepte van de boring. Om de benodigde hoeveelheden precies te berekenen moet dus ook de diepte meegenomen worden. In bijlage 1 is een tabel opgenomen met de verbanden tussen annulaire stroomsnelheid, benodigd gasvolume, boor diameter en diameter boorstang. Ook tijdens de boring moet gecontroleerd worden of er voldoende gas gebruikt wordt. Een goede methode is het bepalen van de tijd tot het gas weer schoon is na het stoppen met boren. Deze tijd mag niet veel meer zijn dan 6 tot 7 seconden per 30,5 meter boorgat [Driscoll,1986].

Uit proeven in de Verenigde Staten met cryogeen boren zijn tevens een aantal gegevens over de benodigde hoeveelheden stikstofgas bekend. In de onderstaande tabel zijn de waarden weergegeven.

Tabel 2.1 Benodigde hoeveelheden stikstofgas voor een aantal proefboringen in de Verenigde Staten [Anonymous,1998]

Diepte boorgat (m)	Diameter boorgat (cm)	Debiet stikstofgas (m ³ /sec)	Totale hoeveelheid gebruikt stikstofgas (m ³)
5,2	9	0.05 - 0.10	850
7,3	20	0.15 - 0.35	N/A
15,8	12	0.10 - 0.35	N/A
24,5	12	N/A	11182
11,3	12	0.14 - 0.40	4247

Als de stikstofgas debieten in de tabel worden vergeleken met waarden voor conventioneel boren met lucht (air drilling) blijkt dat ze vrij goed overeen komen. De benodigde stikstofgas debieten zijn zelfs iets lager dan die minimaal voor boren met lucht nodig zijn. Bij de proeven in de Verenigde Staten is een vrij dikke boorstang gebruikt ten opzichte van de boordiameter (zie figuur 2.4). Door een dikke boorstang te gebruiken blijft de annulaire ruimte klein en is een kleiner debiet nodig. Bij diepere boringen kan eventueel ook extra (gekoelde) lucht vanuit de zijkant van de boorstang toegevoegd worden om de opwaardse snelheid te verhogen



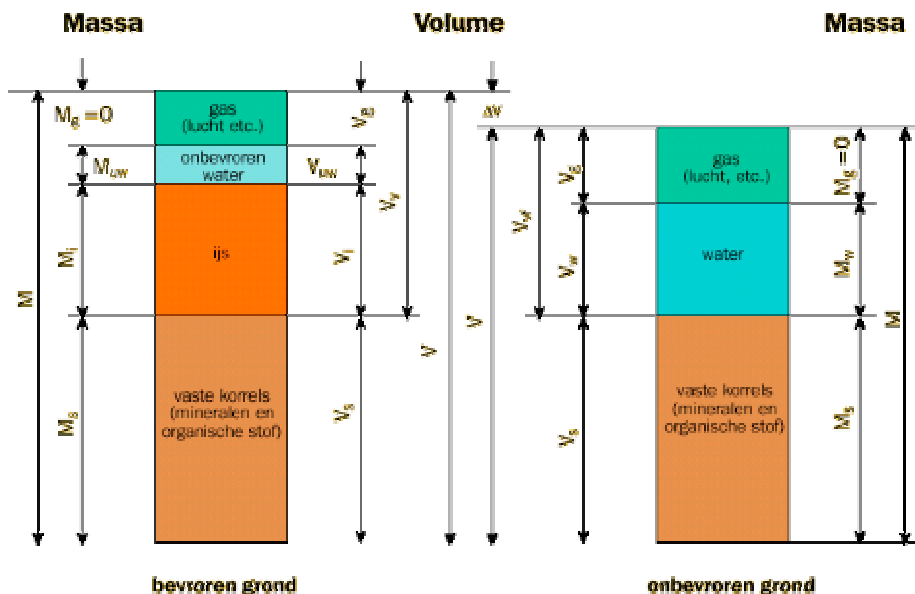
Figuur 2.4 gebruik maken van een dikke boorstang

In VS is tot nu toe met vrij kleine diameters geboord. Een grotere diameter boorgat kan problemen gaan geven voor de benodigde hoeveelheid stikstof. Een oplossing hiervoor is het gebruiken van (gekoelde) lucht als transportmedium, zodat het stikstofgas alleen gebruikt wordt voor het bevriezen van grond, niet voor het transport van losgeboord materiaal. Een andere mogelijkheid is het eerst cryogeen boren van een gat met een kleine diameter, vervolgens door toevoeren van stikstof in het boorgat een groter bevroren grondlichaam maken en vervolgens met een grotere diameter het boorgat te ruimen.

3 Geotechnische aspecten

3.1 Gedrag bevroren grond

Als grond bevroert treden er een aantal processen op. Een van de belangrijkste processen waar rekening mee moet worden gehouden is de volume verandering van water bij bevriezing, een andere naam voor dit proces is vorstheffing. In figuur 3.1 is het proces weergegeven. Bij het boren van putten ontstaat hierdoor het risico dat door de uitzetting van de grond langs het boorgat, de boor niet meer uit het boorgat verwijderd kan worden. Om dit te voorkomen moeten (zoals al eerder aangegeven) beitels aan weerszijden van de boorstang worden aangebracht om de uitgezette grond te verwijderen.



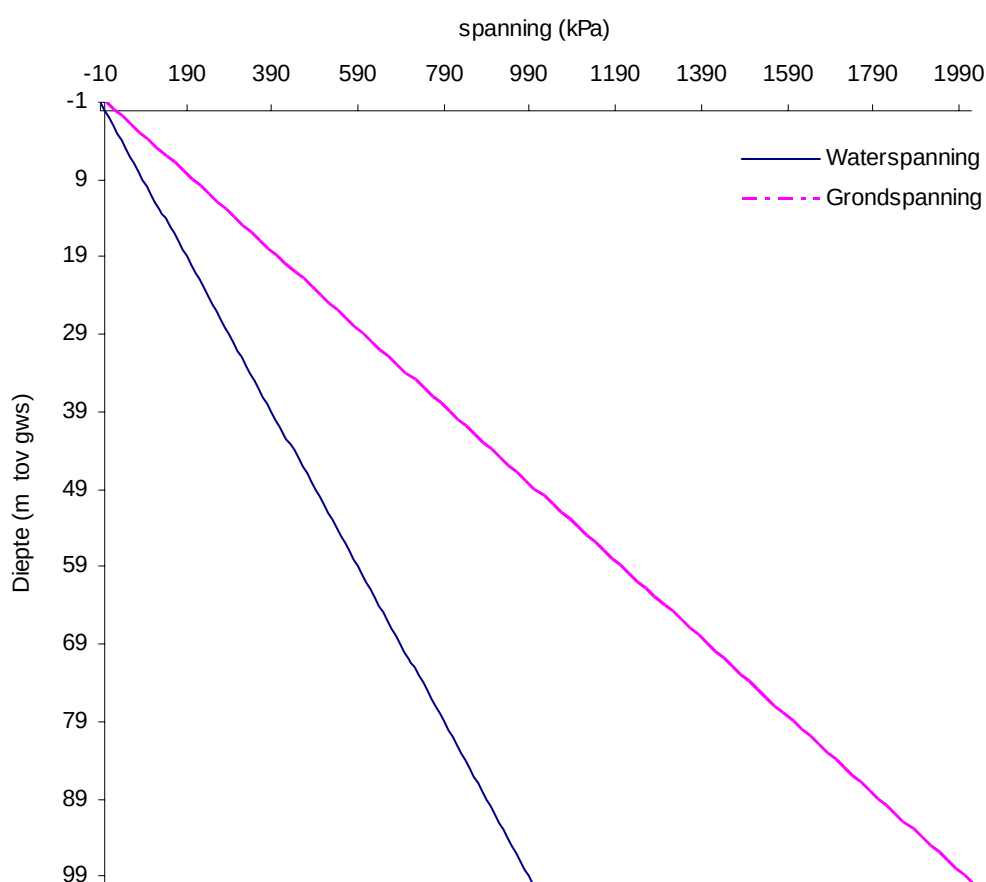
Figuur 3.1 Vorstheffing [Rijkers, 2002]

Het bevriezen en later weer ontdooien van de grond kan aanleiding geven tot gronddeformatie (onder andere ijslensvorming en nazettingen). Gerapporteerde verticale groundbewegingen bij ondiepe groundbevriezingsprojecten liggen typisch in de orde van grootte van 5 cm en kunnen oplopen tot 10 cm. Bij slappe kleisoorten kan de dooi consolidatie tot 25% meer zijn dan de initiële heffing bij bevriezen.

Excessieve thermische koeling kan resulteren in een onregelmatig ijslichaam. Ook is er bij snelle groundbevriezing met zeer lage temperaturen het gevaar van insluiting van een onbevroren groundmassief ("necking") Omdat de expanderende grond dan niet meer gedraineerd wordt kunnen zeer hoge spanningen en deformaties ontstaan waardoor het vrieslichaam kan bezwijken.

3.2 Dikte en sterkte bevroren ring

Voor zeer ondiepe verticale putten is de bevroren ring vrijwel alleen van belang voor het waterdicht maken van de boorwand, ook bij eventuele erosie van de wand. Hiervoor is een dikte van minimaal enkele centimeters voldoende. Bij diepere putten gaat echter ook de gronddruk een rol spelen. De bevroren ring moet dan naast het waterdicht maken van boorgat ook de gronddruk kunnen weerstaan. De gronddruk (of -spanning) is de druk die de korrels en het water tussen de korrels samen uitoefenen. In figuur 3.2 is het verloop van de water- en grondspanning over de diepte weergegeven voor een zandgrond met een dichtheid van 2000 kg/m^3 . Uit de figuur blijkt dat de voor diepe putten van belang zijnde grondspanning op grote diepte een behoorlijke waarde kan aannemen.



Figuur 3.2 Variatie van grond en waterspanning over de diepte voor een grond met een dichtheid van 2000 kg/m^3

Het boorgat van een put kan beschouwd worden als een verticale cilinder in de grond. Er zijn een aantal eenvoudige analytische formules om de benodigde dikte van het vrieslichaam te berekenen. Voor een snelle eenvoudige berekening kan worden uitgegaan van een ketelformule waarmee de spanningen in de cilinder met bevroren grond worden bepaald als gevolg van een bovenbelasting door de grondkolom tot aan het maaiveld. Er wordt dan uitgegaan van het bezwijken van de vriesring op druk.

Voor de bepaling van de benodigde dikte van het vrieslichaam zijn door diverse onderzoekers betrekkelijk eenvoudige formules opgesteld.

[Vyalov, 1962]

$$t = a * \left[\left(\frac{P_0}{q} * \frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} + 1 \right)^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} - 1 \right]$$

[Klein, 1981]

$$t = a * \left[(0,29 + 1,42 \sin \varphi) * \frac{P_0}{q} + (2,3 - 4,6 \sin \varphi) * \left(\frac{P_0}{q} \right)^2 \right]$$

[Pang, 1991]

$$t = a * \left[0,56 * \frac{P_0}{q} + 1,33 * \left(\frac{P_0}{q} \right)^2 \right]$$

Waarin:

- t = benodigde dikte
- a = binnenstraal vrieslichaam
- P_0 = alzijdige gronddruk
- q = vrije prisma sterkte
- φ = hoek van inwendige wrijving

De parameters vrije prisma sterkte en de hoek van inwendige wrijving volgen uit laboratoriumproeven waarbij een (in dit geval bevroren) grondmonster belast wordt (drukproef / triaxiaalproef)

Gezien de geringe diameter van de pompputten zullen er waarschijnlijk niet snel problemen ontstaan. Toch kan het goed zijn om in een nader onderzoek (zeker wanneer ook diepere putten en putten met grotere diameters geboord moeten worden) aandacht te besteden aan sterkteberekeningen van het vrieslichaam. Momenteel is bij Kiwa deze kennis nog niet aanwezig. Voor daadwerkelijke sterkte berekeningen kan eventueel contact gezocht worden met Geodelft. Voor onder andere de Westerschelde tunnel en de boortunnel Groene hart heeft Geodelft al veel onderzoek gedaan naar de sterkte van vrieslichamen.

3.3 Groeisnelheid bevroren grondring

De groeisnelheid van het ijslichaam rond het boorgat en voor de boorkop uit is een belangrijke parameter. Deze parameter bepaald de benodigde temperatuur van de stikstof en de maximale boorsnelheid. Als de boorsnelheid groter wordt dan de bevroeringsnelheid, wordt de put 'lekgeboord' en zal er grondwater naar binnen dringen. Dit heeft catastrofale gevolgen. Het binnendringende water bevriest op de boorgatwand, boorstang en boorkop, waardoor het materieel vast komt te zitten. Dit probleem is al eens opgetreden bij een proefboring in een sterkdoorlatende, snelstromende aquifer in de Verenigde Staten in 1995 [Simon & Cooper, 1996]. Door langzamer te boren kon de boring alsnog voltooid worden. Bij deze boring ging het om een vulkanisch sediment met spleten. Vooral de hoge stroomsnelheid bij spleetstroming is een probleem bij het bevroeren. In de meeste Nederlandse sedimenten zullen dergelijke problemen naar verwachting kleiner zijn.

Voor het bevroeren van grond met behulp van vrieslansen zijn een aantal formules beschikbaar. Het bevroeren en bevroren houden van de wand van het boorgat is vergelijkbaar met het bevroeringsproces met behulp van een vrieslans. De benodigde tijd om een vrieslichaam te laten groeien tot een straal R volgt uit [Sanger & Sayles *vide* Van Meerten & Meijers, 1999]:

$$t_1 = \frac{R^2 L_1}{4\kappa_f T_s} \left[2\ln(R/r_0) - 1 + \frac{C_f T_s}{L_1} \right]$$

met

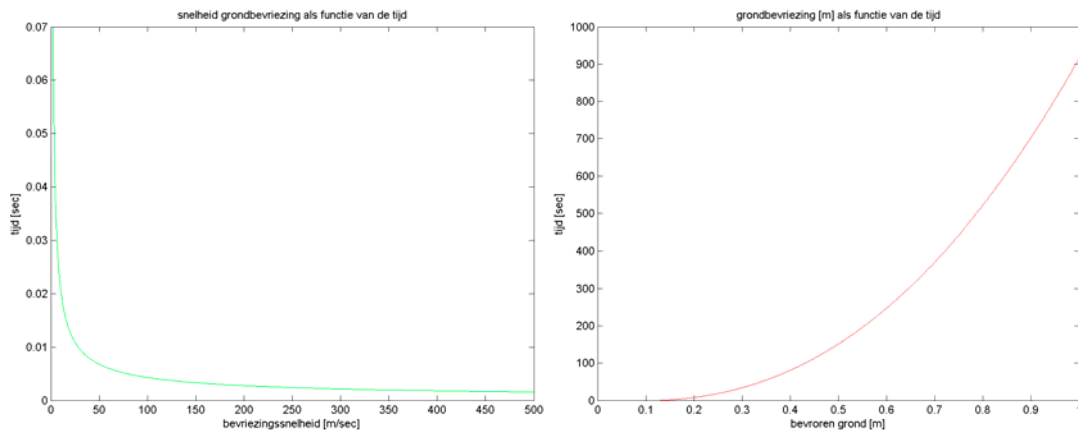
$$L_1 = L + \frac{a_r^2 - 1}{2\ln a_r} C_u T_0$$

waarin:

- t_1 = vriestijd (sec)
- κ_f = warmtegeleiding bevroren grond (W/m °K)
- C_f = vol. warmtecapaciteit bevroren grond (kJ/m³ °K)
- C_u = vol. warmtecapaciteit onbevroren grond (kJ/m³ °K)
- L = smeltwarmte met betrekking tot het aanwezige poriewater (kJ/m³)
- r_0 = straal van de vrieslans(boorgat) (m)
- a_r = omgevingsparameter (-)
- R = straal vrieslichaam
- T_0 = verschil tussen begintemperatuur grond en vriespunt water (°K)
- T_s = verschil tussen temperatuur vrieslans (of boorgat) en vriespunt water (°K)

Als voorbeeldberekening is gekozen voor een boring/vrieslans in een zandpakket, waarbij de volgende parameter waarden zijn gekozen:

$$\begin{array}{ll} \kappa_f &= 4,6 \text{ W/m } ^\circ\text{K} & r_o &= 0,1 \text{ (m)} \\ C_f &= 2000 \text{ kJ/m}^3 \text{ } ^\circ\text{K} & a_r &= 3 \text{ (-)} \\ C_u &= 2700 \text{ kJ/m}^3 \text{ } ^\circ\text{K} & T_0 &= 8 \\ L &= 334 \cdot 10^3 \text{ kJ/m}^3 & T_s &= 100 \end{array}$$



Figuur 3.3 Bevriezingssnelheid en groei bevroren grondmantel als functie van tijd

In figuur 3.3 is het bevroeringsverloop van de grond weergegeven. Uit de grafieken blijkt dat de eerste decimeter vrijwel meteen bevriest, vervolgens neemt de vriessnelheid echter af. Voor het waterdichtmaken van een verticaal boorgat is slechts een bevroren ring van enkele centimeters nodig. Uit de berekening blijkt dat het boorgat waarschijnlijk probleemloos “in den droge” geboord kan worden.

Waarschijnlijk gaat de gebruikte vergelijking redelijk goed op voor de situatie bij

De gebruikte vergelijking is gericht op een stationaire warmtestroom, er wordt dus uitgegaan van een evenwichtsituatie voor de warmtestroom in de grond. In werkelijkheid zal dit niet zo zijn en moet worden uitgegaan van een niet stationaire warmtestroom. De bovenstaande formule is verder gericht op bevroering met vrieslansen waarbij een cilinder bevroren grond ontstaat.

Het bepalen van de snelheid van bevroeren voor de boorkop uit is een stuk complexer. Voor het nauwkeuriger inschatten van de bevroering voor de boorkop uit is waarschijnlijk een modellering met een numeriek rekencode nodig. Een voorbeeld van een dergelijke rekencode is het eindige elementen programma DIANA. Dit programma is ook gebruikt voor de vriesberekeningen voor de Westerscheldetunnel [Meerten & Meijers, 1999].

Op basis van ervaringen in de Verenigde Staten [Simon & Cooper, 1996] kan een inschatting worden gemaakt van de snelheid waarmee maximaal geboord kan worden. In het voorbeeld aan het begin van deze paragraaf ontstonden geen problemen bij een boorsnelheid van 1,5 m/uur. Dit is natuurlijk erg langzaam, maar zoals al is aangegeven ging het daarbij om een boring in een aquifer met moeilijk te bevroren spleetstroming.

In een ander voorbeeld is tot ongeveer 10 meter onder de grondwaterspiegel geboord bij een boorsnelheid van 6 m/uur. Het ging hierbij om een boring in afzettingen met grind en zand en klei en een grondwaterspiegel op ongeveer 3m beneden maaiveld. De omstandigheden van deze proef zijn zeker meer vergelijkbaar met de Nederlandse. Bij een tweetal andere boringen is met een snelheid van 3 m/uur eveneens probleemloos onder de grondwaterspiegel geboord.

Uit de snelheid van het bevriezen van de (zand)grond kan de maximale boorsnelheid worden afgeleid. Uitgaande van het feit dat de eerste centimeters van de grond binnen enkele seconden (stel: 1 cm/5 sec.) bevroren zijn, kan er maximaal met een snelheid van 7 m/uur geboord worden. Dit komt redelijk overeen met de 6 meter/uur waarmee in de Amerikaanse situatie is geboord. Waarschijnlijk zal in veel gevallen met een lagere snelheid moeten worden geboord, doordat bijvoorbeeld door grondwaterstroming de bevroering trager verloopt. Grondwaterstroming kan voor zogenaamde 'windows' in een ijsmassief zorgen, omdat hierdoor lokaal warmte wordt aangevoerd [Meerten & Meijers, 1999].

4 Kosten

4.1 Algemeen

Volgens het department of Energy in de VS kan cryogeen boren met stikstofgas in bepaalde gevallen goedkoper zijn dan conventionele technieken [Anonymous, 1998]. In veel gevallen zal cryogeen boren echter duurder uitpakken dan conventioneel boren. In deze gevallen moet men de meerkosten afwegen tegen de voordelen van de techniek. De verschillen in boorkosten van cryogeen boren ten opzichte van conventionele technieken worden veroorzaakt door de kosten voor het omvormen van een conventionele boorstelling en de kosten voor de stikstof aanvoer. De meerkosten van het cryogeen boren kunnen eventueel op de lange termijn weer terugverdiend worden door een betere ontwikkeling van de put en minder regeneraties.

Bij het vergelijken van de kosten tussen conventionele technieken en cryogeen boren moeten de volgende punten in de overweging meegenomen worden:

- Lokale eigenschappen van de boorlocatie
- Het doel van de boring
- Wet en regelgeving (vergunningen e.d.)
- Beschikbaarheid van uitrusting en voorraden

4.2 Investeringskosten

Het aanpassen van een standaard boorwagen aan de eisen van cryogeen boren vraagt een investering. Het gaat hierbij om de kosten van aanpassingen aan de boorwagen en om de kosten van de speciale uitrusting voor cryogeen boren. De kosten van het aanpassen van een boorwagen (o.a. gereedschap om de boorstangen aan elkaar te bevestigen, de mogelijkheid om de swivel te bevestigen en een veiligheidsdoek om het personeel te beschermen tegen de koude stikstof) bedragen ongeveer 1000 euro, de kosten voor de speciale koude bestendige uitrusting (o.a. een nieuwe swivel, boorstang en boorgruis afscheider) bedragen ongeveer 10.000 tot 15.000 euro.

4.3 Uitvoeringskosten

De (extra) uitvoeringskosten bij cryogeen boren worden bepaald door de kosten van de aanvoer, de gebruikte hoeveelheid stikstof en het personeel nodig om het aanvoersysteem te bedienen. Vloeibare stikstof is commercieel beschikbaar in grote hoeveelheden en kan veelal met een tankwagen worden aangeleverd. Vloeibare stikstof kost (in de VS) ongeveer 10 tot 25 cent per m³. De benodigde hoeveelheid stikstof is afhankelijk van de boorcondities en geeft (Verenigde Staten) een toename in de boorkosten van ongeveer 15 tot 55 euro per meter ten opzichte van standaard boorkosten.

Tabel 4.1 Geschatte kosten voor een boring van ongeveer 20 m bij een druk van 1400 kPa [Anonymous, 1998]

Drilling system	Rate	Cost
Nitrogen (0-1400 kPa)		
Mobilisation/ demobilisation	\$295	\$ 295
Tanker rental	\$125/day (1 day)	\$ 125
Nitrogen	\$0,15/m ³ (4000 m ³)	\$ 600
Trip Mileage	\$2.00/mile (est 100 mile)	\$ 200
Nitrogen Subtotal		\$1220
Auger drilling rig		
Mobilisation/ demobilisation	\$1000	\$1000
Rig and crew	\$145/h (8h)	\$1160
Trip mileage	\$2.00/mile (est 100 mile)	\$ 200
Drilling supplies	\$200	\$ 200
Drilling subtotal		\$2560
Total cost		\$3780

Tabel 4.2 Geschatte kosten voor een boring van 50 m bij een druk van 1500 kPa in Nederland

Diameter boorgat (m)	Diameter boorstang (m)	annulus (m)	debiet (m3/s)	volume gas (m3)	volume vloeistof bij 1500 kPa (m3)	Kosten som (euro)
0.6	0.58	0.01	0.28	8341	3.14	2547
0.6	0.56	0.02	0.55	16399	6.17	3851
0.6	0.52	0.04	1.06	31667	11.92	4426
0.6	0.50	0.05	1.30	38877	14.64	4697
0.6	0.46	0.07	1.75	52449	19.75	5208
0.6	0.44	0.08	1.96	58811	22.14	5447
0.5	0.48	0.01	0.23	6927	2.61	2494
0.5	0.46	0.02	0.45	13572	5.11	2744
0.5	0.42	0.04	0.87	26012	9.79	4213
0.5	0.40	0.05	1.06	31809	11.98	4431
0.5	0.36	0.07	1.42	42553	16.02	4835
0.5	0.34	0.08	1.58	47501	17.88	5022
0.4	0.38	0.01	0.18	5513	2.08	2441
0.4	0.36	0.02	0.36	10744	4.04	2638
0.4	0.32	0.04	0.68	20358	7.66	4000
0.4	0.30	0.05	0.82	24740	9.31	4165
0.4	0.26	0.07	1.09	32657	12.29	4463
0.4	0.24	0.08	1.21	36191	13.62	4596
0.3	0.28	0.01	0.14	4100	1.54	2388
0.3	0.26	0.02	0.26	7917	2.98	2531
0.3	0.22	0.04	0.49	14703	5.54	2787
0.3	0.20	0.05	0.59	17671	6.65	3899
0.3	0.16	0.07	0.76	22761	8.57	4090
0.3	0.14	0.08	0.83	24881	9.37	4170
0.2	0.18	0.01	0.09	2686	1.01	2334
0.2	0.16	0.02	0.17	5089	1.92	2425
0.2	0.12	0.04	0.30	9048	3.41	2574
0.2	0.10	0.05	0.35	10603	3.99	2633
0.2	0.06	0.07	0.43	12865	4.84	2718
0.2	0.04	0.08	0.45	13572	5.11	2744
0.1	0.08	0.01	0.04	1272	0.48	2281
0.1	0.06	0.02	0.08	2262	0.85	2318
0.1	0.02	0.04	0.11	3393	1.28	2361

In tabel 4.2 is een globale inschatting weergegeven van de kosten van een cryogene boring in Nederland. De inschatting is gebaseerd op door Hoekloos aangeleverde kosten voor het gebruik van stikstof. Voor de berekening is uitgegaan van een boring met een diepte van 50 meter waarbij geboord wordt met een snelheid van 6 m/uur. In de tabel zijn voor verschillende diameters en diktes van de boorstang de benodigde hoeveelheden stikstof en de kosten hiervan weergegeven. De kosten zijn inclusief transport en opbouw van de installatie op de locatie en een tweetal medewerkers. De in de tabel weergegeven kosten moeten worden geïnterpreteerd als extra kosten bovenop de kosten van een standaard boring in vast gesteente.

Uit de tabel blijkt dat met name bij grote diameters de kosten sterk toe nemen. De bepalende factor voor de benodigde debieten en daarmee voor de kosten is de dikte van de annulus (ruimte tussen boorgatwand en de boorstang). Door de dikte van de annulus te beperken kan een grote kostenbesparing gehaald worden.

Voor een gangbare put van 50 meter diepte met een diameter van 60cm bedragen de meerkosten van cryogeen boren ongeveer 5,5k€. Uitgaande dat de totale kosten van een nieuwe put met deze dimensies ongeveer 70k€ bedragen zijn de meerkosten van cryogeen boren ongeveer 4% van totale kosten. In vergelijking met regeneratiekosten voor boorgatwandverstopping (ongeveer 4k€ per regeneratie) zijn de meerkosten van 5,5k€ niet extreem hoog. Als blijkt dat door cryogeen boren het aantal regeneraties werkelijk kan worden teruggedrongen kan cryogeen boren hierdoor economisch interessant worden.

5 Opzet praktijkproef

Aan de hand van de resultaten van een praktijkproef kan concreet worden beoordeeld of de techniek voldoende mogelijkheden biedt voor een algemene toepassing bij grondboringen in Nederland en specifiek voor het boren van pompputten.

Alvorens over te gaan tot de praktijkproef zal eerst overleg plaatsvinden tussen de deskundigen op het gebied van: vriezen met stikstof (Hoekloos), hydrologie en putten (Kiwa) en grondboringen (Haitjema, Dura Vermeer en Bam nbm). Tijdens dit overleg wordt besloten of de techniek voldoende perspectief biedt voor de benodigde investeringen en hoe het vervolgtraject verder zal worden ingericht.

Gezien de innovativiteit van de techniek (eerste toepassing in Europa) en de brede toepassingsmogelijkheden onder andere binnen de drinkwatersector en de milieutechniek kan voor de financiering overheidssubsidie worden aangevraagd. De uitvoering van de proef is bij een positief besluit van de betrokkenen gepland in de periode 2005 - 2006

Als besloten wordt door te gaan met een veldproef moet er een geschikte proeflocatie gevonden worden. Hiertoe kunnen de waterleidingbedrijven benaderd worden. Voor de keuze van de proeflocatie is de geohydrologie maatgevend. De locatie moet voldoende representatief zijn voor de geohydrologie op andere plaatsen in Nederland. De voorkeur gaat uit naar een situatie met een langzaam stromende grof zandige aquifer. De stroomsnelheid mag niet te hoog zijn, om te voorkomen dat er teveel warmte wordt aangevoerd met het grondwater. Een locatie waarbij op korte afstand grondwater wordt onttrokken is dus niet geschikt.

De moeilijkheidsgraad van de boringen neemt toe naarmate de boordiameter en diepte groter is. Bij de proeven in de VS is met diameters tot 20 cm geboord. Bij de eerste proeven in Nederland bestaat daarom de voorkeur om de diameter te beperken tot ongeveer 20 cm en de diepte tot ongeveer 20 meter beneden maaiveld.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

- Cryogeen boren is een schone boortechniek, waarbij geen spoeling nodig is. Het optreden van een film van deeltjes op de boorgatwand is hierdoor niet mogelijk.
- De formatie van de aquifer wordt bij cryogeen boren in tegenstelling tot gangbare boortechnieken alleen tijdelijk beïnvloed, na dooien herstelt de permeabiliteit zich weer volledig.
- De techniek is niet belastend voor de omgeving van de boorlocatie. Eventuele verontreinigingen in bovenliggende pakketten worden door het bevriezen van de grond niet verspreid naar de ontgonnen aquifer.
- Cryogeen boren is toepasbaar binnen de waterwinning, milieutechniek, warmte-koude opslag en gestuurde boringen. Gezien de ervaringen in de VS is de techniek (met enige aanpassingen) waarschijnlijk ook in Nederland toepasbaar.
- De techniek van cryogeen boren heeft grote overeenkomsten met conventioneel roterend luchtboren.
- De benodigde aanpassingen aan standaard boormaterieel zijn gering, wel moet het boorpersoneel getraind worden in de omgang met zeer lage temperaturen
- De belangrijkste factoren die het slagen van de techniek bepalen zijn: de bevroingsnelheid van de formatie, de boorsnelheid, de sterkte van het vrieslichaam en het benodigde volume stikstofgas om het boorgruis af te voeren.
- De kosten zijn naar verwachting hoger dan bij conventionele technieken. De kosten worden sterk bepaald door de benodigde hoeveelheid stikstof (en daarmee de capaciteit van de gasinstallatie) en de duur van de boring.
- Door het bevriezen van de grond is het boorgat stabiel en is een casing niet nodig, hierdoor kan met kleinere diameters geboord worden, door gebruik te maken van een natuurlijke omstorting kan dit effect nog worden versterkt. (is niet primair relevant voor het onderzoeksdoel)

Eindconclusies

- Cryogeen boren is een schone boortechniek, die met een aantal aanpassingen aan boormaterieel toepasbaar is in Nederland.
- Technisch gezien is cryogeen boren haalbaar tot diepten van 50m en diameters van 60cm. Grotere diepten/ diameters vergen aanzienlijk hogere kosten omdat druk en gasdebiet veel groter moeten zijn
- Een veldproef kan pas definitief uitsluitsel geven over benodigde druk, debiet en haalbare boorsnelheden
- De indicatieve meerkosten ten opzichte van een conventionele boring (diepte 50m, diameter 60 cm) bedragen 2 - 5,5k€ (afhankelijk van diameter/diepte)

- Benodigde aanpassingen en investeringen om boormaterieel geschikt te maken voor cryogeen boren zijn gering.
- De techniek biedt tevens perspectief in bijzondere situaties (moeilijk te doorboren formaties, grote onverzadigde zone's, artesisch grondwater, geotechnische metingen en bij bodem- en grondwaterverontreiniging. Ook bij bijzondere boortechnieken (bijvoorbeeld horizontaal gestuurd boren) kan de techniek wellicht toepasbaar zijn.

6.2 Aanbevelingen voor vervolg onderzoek

- Met name op het gebied van sterkte en stabiliteit van de bevroren boorgatwand is nog weinig bekend. Om hier meer inzicht in te verkrijgen kan contact gezocht worden met bijvoorbeeld Geo-Delft
- In de meeste bevroeringsformules wordt de latente warmte (warmte nodig bij faseovergang) niet goed meegenomen. Dit is echter voor de snelle bevroering voor de boorkop uit van groot belang. In een vervolgonderzoek moet hier meer aandacht aan worden besteedt.
- Om de bevroering van de grond goed in kaart te brengen is het maken van een model gewenst.
- Het is nog onduidelijk of de in Nederland gangbare boorwagens (bij het cryogeen boren van grotere diameters) voldoende druk op de boorkop kunnen leveren om de harde bevroren grond te kunnen doorboren. Het is aan te bevelen dit bij een vervolgstudie samen met de boorbedrijven nader te onderzoeken.
- Uit het onderzoek blijkt dat de benodigde hoeveelheid stikstof vrij groot is bij grotere diameters. Het merendeel van de benodigde stikstofgas wordt gebruikt voor het transport van losgeboorde deeltjes. Mogelijkheden om voor het transport geen stikstof maar lucht te gebruiken moeten verder worden geanalyseerd.
- Het wel of niet toepassen van de techniek staat of valt bij de meerkosten ten opzichte van een gewone boring. De kosten in dit rapport zijn indicatief. Het is belangrijk om een goede kostenvergelijking te maken waarbij niet alleen de meerkosten van cryogeen boren maar ook de kosten reducerende effecten van de techniek (reductie van de ontwikkeling, regeneraties en afschrijving van een pompput) mee te nemen.

Literatuur

Anonymous, (1998) Cryogenic Drilling, Innovative Technology Summary Report DOE/EM-0382. US Department of Energy and Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California.

Anonymous, (2002), rapport F100-E-02-079 Aanleg dwarsverbindingen met grondbevriezing bij de Westerscheldetunnel, COB, Gouda

Anonymous, (2003), rapport F100-E-03-092, deel 2, Dwarsverbindingen met grondbevriezing, Frostheave onderzoek in Nederlandse grond, COB, Gouda

Beek, Kees van, Ate Oosterhof, Rob Breedveld en Bert-Rik de Zwart (2004), 'Zelfregenererende pompputten, Frequent schakelen voorkomt mechanische putverstopping', H2O 37 (18).

Driscoll, G.D., (1986) Groundwater and Wells, second edition, Johnson Division, St. Paul, Minnesota, USA

Rijkers R., (2002) Aanleg dwarsverbindingen Westerscheldetunnel middels grondbevriezing. Informatie nr. 12, 2002. TNO (praktijkonderzoek in opdracht Centrum Ondergronds Bouwen)

Schrama, E.J., M.L.M. Balemans & C.G.E.M. van Beek, (2001) Quick scan putverstopping en regeneratie bij vijf waterbedrijven, Kiwa Water research, Nieuwegein

Simon R.D., and G.A. Cooper, (1996). Cryogenic drilling: a new drilling method for enviromental remediation, Groundwater Monitoring Review 16(3) pp 79-85

Gras B., (2002) Rapport TRIZ project verstopping van pompputten. Nieuwe concepten ter voorkoming van veel voorkomende vormen van verstopping. Innovation Quotiënt, Valkenswaard.

L'Espoir, John, (2003) Transfer of technology/, In conclusion: Formulas, Glossary, Conversions, Water Well Journal pp 40-44

Mesman T.J., (1999). Grondbevriezing uitvoeringspraktijk, Commissie M530 CUR/COB, Gouda

Meerten J.J. van en P. Meijers, (1999), Boortunnel Groene Hart, Bevriezen van grond, state of the art inventarisatie van kennisleemten, HSL zuid/GeoDelft, Utrecht

Bijlage 1 Benodigde volumes

Tabel minimaal benodigd volume voor een boring tot 150 m-mv

Boorgat diameter cm	boorstang cm	annulaire ruimte cm	Benodigd volume (m ³ /s)
12.07	7.30	2.4	0.12
	6.03	4.5	0.14
15.88	8.89	3.5	0.22
	7.30	4.3	0.24
17.15	8.89	4.1	0.27
18.73	8.89	4.9	0.33
20.00	11.43	4.3	0.33
	8.89	5.6	0.39
22.23	12.70	4.8	0.41
	11.43	5.4	0.44
	8.89	6.7	0.50
22.86	12.70	5.1	0.44
	11.43	5.7	0.48
	8.89	7.0	0.53
25.08	13.97	5.6	0.53
	12.70	6.2	0.57
	11.43	6.8	0.60
27.94	16.83	5.6	0.61
	13.97	7.0	0.71
	11.43	8.3	0.78
31.12	16.83	7.1	0.82
	13.97	8.6	0.92
	11.43	9.8	1.00
38.10	16.83	10.6	1.39
	13.97	12.1	1.49
	11.43	13.3	1.56
44.45	16.83	13.8	2.01
	13.97	15.2	2.11
	11.43	16.5	2.18

Bijlage 2 Artikel Simon & Cooper

Cryogenic Drilling: A New Drilling Method for Environmental Remediation

by Rafael D. Simon and George A. Cooper

Abstract

Cryogenic drilling is a technique developed at the University of California (UC), Berkeley, for drilling in unstable sediments of environmental monitoring, for characterizing, and for remediation wells. The method uses standard air rotary drilling techniques, but with cold nitrogen rather than ambient air as the circulating fluid in order to freeze and stabilize the borehole wall. Several laboratory and full-scale field tests have been performed. A 52-foot-deep (16 m) soil boring and 24-foot (7 m) monitoring well have been drilled as part of the Lawrence Berkeley Laboratory Site Characterization Project. Continued testing and refinement of the equipment and operational method are in progress. The method has been proposed for use as part of the Department of Energy (DOE) weapons site cleanup at locations with unstable sediments such as Hanford, Sandia, and Idaho National Engineering Laboratory (INEL).

Introduction

The drilling of environmental monitoring, characterization, and remediation wells is a significant part of the environmental cleanup industry. A recent DOE report estimates that \$230 billion will be needed to clean up DOE weapons sites during the next 75 years (Department of Energy 1995), and environmental drilling is a major component. Drilling techniques that can make holes in a variety of sediments without introducing new contaminants or altering existing contaminants at a competitive price are in high demand.

Cryogenic drilling is a novel drilling technique that uses standard air rotary drilling methods but employs cold nitrogen rather than ambient air as the circulating fluid in order to freeze the borehole wall while drilling (see Figure 1). In addition to providing for stable boreholes in unconsolidated ground, cryogenic drilling (cryodrilling) offers several other advantages: it produces fewer cuttings than liquid-based drilling systems; it requires only minimal equipment modifications to existing drill rigs; and it does not add any contamination during drilling because nitrogen gas is environmentally benign. The method also causes only temporary formation damage in that, while frozen, the borehole walls are impermeable to liquids, but after the well is cased, the surrounding ground is allowed to thaw. Perhaps the most important advantage to cryodrilling is that pollutants near the wellbore will be

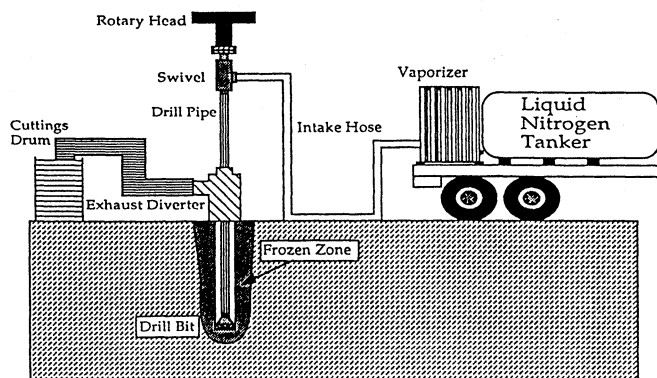


Figure 1. Cryogenic drilling schematic.

frozen in place, thus preventing them from using the borehole as a conduit to contaminate clean zones or from being carried to the surface with the drill cuttings. The freezing in place of the subsurface liquids also introduces interesting possibilities for the recovery of representative samples.

Background

The technique was developed for the DOE as a means for the investigation and remediation of several of its contaminated sites. These sites—such as Sandia National Laboratory, Hanford, Idaho National Engineering Laboratory—contain areas with loose and unconsolidated sands, gravels, and boulders, with a deep water table. Because of the unstable nature of the sediments and the need for high sample quality and minimal environmental impact, these sites pose drilling problems that have challenged conventional drilling technology. According to a 1993 report commissioned by the DOE, “no approach is likely to be taken directly off the shelf and applied to [underground tank drilling at Hanford] without some degree of modification” (K & M Engineering 1993).

This report illustrates some of the drilling difficulties posed by the Hanford site including the following:

- Borehole stability problems due to the presence of unconsolidated sands, gravels, and boulders (especially problematic for inclined and horizontal holes)
- Difficulties posed by alternating layers of hard and soft (or crumbly) material
- Safety issues including health risks due to possible circulation of contaminants
- Environmental issues concerning the danger of actually increasing the scope of contamination by flushing contaminants downward toward the water table
- Need for high-quality soil samples and monitor well samples
- Overall environmental impact of drilling method (no addition of contaminants during the drilling process).

The DOE has engaged in research and development projects concerned with improving and developing drilling technologies to better address these concerns. Cryogenic drilling is one of a number of technologies that have been supported by the DOE.

Neither drilling with a gas nor using liquid nitrogen to freeze moisture underground for stabilizing purposes are new ideas. Low-temperature fluids have been used to freeze soils since the nineteenth century in order to stabilize unconsolidated soils and control ground water near construction sites (Veranneman and Rebhan 1979). Common practice involves the drilling of numerous vertical holes, inserting a metal tubing, and circulating a low-temperature fluid, usually cold brine or liquid nitrogen. This is normally done in shallow sediments where boreholes can be drilled with hollow stem augers or by simply pushing a spiked pipe into the ground. Cryogenic drilling applies the principles of ground freezing to the immediate zone around the borehole wall, providing stability where it is needed the most while simultaneously advancing the borehole.

Until recently, environmental drilling usually involved drilling vertical wells for ground water monitoring, pump and treat, and other types of remediation. For these typically shallow wells, hollow stem auger drilling has been the most widely used drilling method (Kirby and Savage 1992). For deeper wells or for sites where hard rock is present, rotary drilling using mud or air circulation is the standard technique. For many unconsolidated site geologies, standard air drilling cannot be used because of inadequate hole stability. While drilling with mud can provide excellent hole stability, it is rarely used for environmental drilling because of environmental regulations, waste disposal costs, and sample quality requirements. In the past two decades, various air drilling methods have been devised to drill through unstable sediments by advancing a casing while drilling in order to stabilize the borehole. These techniques include the “drill through casing driver” (Herrick 1993) and ODEX drilling methods (Murphy 1991). Recently, new drilling techniques have been developed or adapted for drilling environmental wells. These include sonic drilling (Barrow 1994) and various rod pushing techniques developed for the utility industry (Kramer et al. 1992) that may be useful for drilling the slant and horizontal wells that are being demanded for new barrier placement and remediation methods. Each of the aforementioned techniques has advantages and disadvantages; it is likely that most of these methods will have a role in the future of environmental drilling, as will cryogenic drilling.

Laboratory Experiments

While there was some interest in the past in using low-temperature fluids for drilling purposes, there has been no documented field testing or published work on this subject. Therefore, a series of preliminary laboratory experiments was conducted at UC Berkeley before actual field testing began. These tests were performed to determine the strength of frozen sands and gravels at different temperatures and water contents, the strength of frozen boreholes, and the time needed to freeze boreholes when injecting cold nitrogen gas. Laboratory drilling tests were performed using a 1.25-inch (3.2 cm) microbit to determine the rate of penetration

achievable under different confining pressures, nitrogen flow rates, and water contents. Tests were also performed on a larger outdoor test drill rig to determine the robustness of the process and the toughness of the drilling equipment under low-temperature operating conditions. For detailed information on the laboratory tests, see Simon and Cooper (1994).

The following conclusions were drawn from the laboratory tests:

- Adequate strength to stabilize near surface boreholes can be achieved with as little as 2.5 percent water content (9 percent saturation of a uniform unconsolidated sand). This means that cryogenic drilling should be possible even in dry, arid sites such as Hanford
- A frozen annulus on the order of an inch or two (2.5 to 5 cm) develops within minutes and grows to several inches after prolonged nitrogen circulation
- Rates of penetration up to 30 feet per hour (9 m/hr) can be maintained in the laboratory while concurrently freezing the borehole walls under pressure
- The overall cryogenic drilling process is achievable with only minimal equipment modifications.

Field Tests

Site

Due to its proximity to UC Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory (LBL) was chosen as the site for the first field tests. LBL is currently engaged in a characterization program as part of the DOE's site cleanup process. Due to the experimental nature of the process, the sites chosen ranged from clean to lightly contaminated. Field tests were conducted between May 1994 and May 1995 with Westex Drillers of Sacramento, California, and UCISCO Industrial Gases of Pittsburgh, California.

Equipment Set-up

A standard top-drive Mobile Drill B61 rig was used for all of the field tests. This rig, although primarily used for auger drilling, was chosen because of its availability and simplicity. It was converted for use for cryogenic drilling with minimal alterations. This was achieved by isolating the parts of the drill rig that came into contact with cryogenic fluids. For a top-drive rotary drill rig like the B61, this meant placing a side entry swivel below the rotary head for nitrogen intake. As a result, the only pieces of equipment that came into contact with cryogenic fluids were the intake hose, swivel, drill pipe, drill bit, cuttings diverter, and cuttings hose (see Figure 2).

For the pieces of drilling equipment that came into contact with cryogenic fluids, materials that do not become brittle at low temperatures were used. These include metals such as stainless steel, aluminum, brass, bronze, copper, and 9 percent nickel steel and polymers such as PTFE; 304 stainless steel was used for the equipment described previously because of its high strength. Stainless steel is about five times as expensive as the high-carbon steel normally used for drilling equipment,

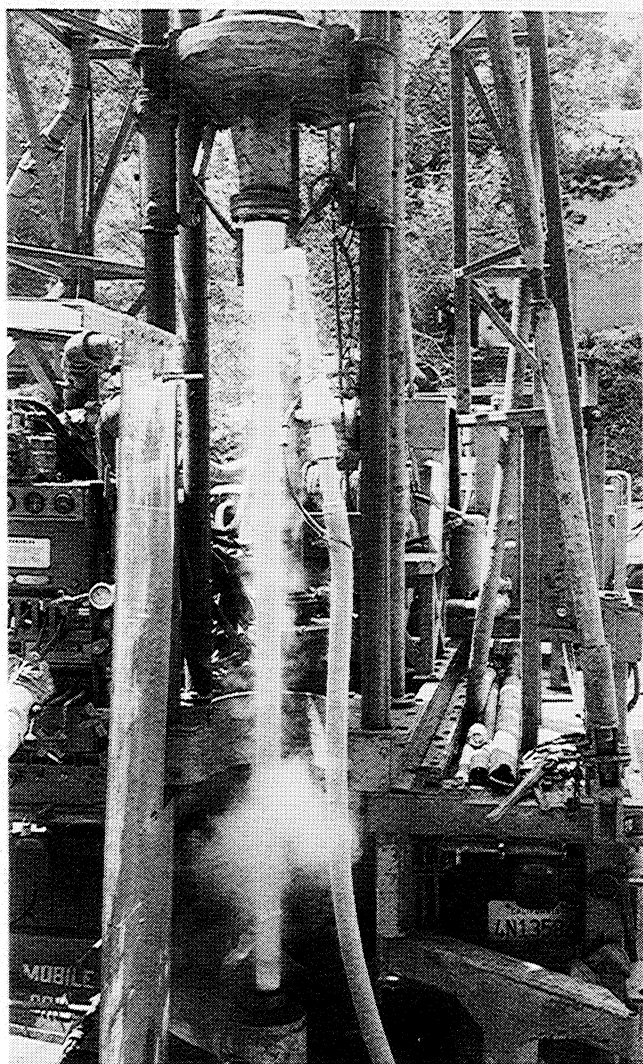


Figure 2. Only the intake hose, swivel, and drill stem come into contact with cryogenic fluids.

resulting in a few thousand dollars of extra material costs.

Converting the drill rig from auger drilling configuration to cryodrilling configuration took about one-half hour. The steps involved were the replacement of the auger head by a side entry swivel, the attachment of the nitrogen intake hose to the swivel, the placement of the cuttings diverter over the exposed conductor casing, and the installation of a safety shield.

UCISCO's atmospheric vaporizer unit (AVU) was used to deliver cold nitrogen gas to the swivel intake port (see Figure 3). The unit has a 3200 liter, 230 psi (1500 kN/m²) liquid nitrogen tank capable of delivering 300,000 scf (8500 m³) of gaseous nitrogen. It can provide a flow rate of 500 scfm (14 m³/min) of ambient gaseous nitrogen at any pressure up to 230 psi (1500 kN/m²) by flowing liquid nitrogen through a vaporizer made from a series of finned tubes exposed to the atmosphere. It also has the capability for much higher flow rates if its steam heat exchanger is used to vaporize the liquid nitrogen instead of using the atmospheric vaporizer. After being vaporized, the nitrogen gas can then be cooled to any temperature down to -196°C by means of a tempering valve that mixes liquid nitrogen with the



Figure 3. UCISCO's atmospheric vaporizer unit.

gaseous nitrogen immediately before delivery into the nitrogen hose that leads to the drill rig. The tanker can thus provide variable and accurate gas pressures, nitrogen flow rates, and temperatures by simply adjusting a few valves. The unit is quiet and is designed to be run by trained on-site personnel as opposed to liquid nitrogen specialists.

Early Tests

The early field tests were designed to test the specially designed cryogenic drilling equipment and the overall drilling process. In the first test, conducted in April 1994, a 3.5-inch-diameter (9 cm), 17-foot (5 m) borehole was drilled using a roller cone bit. This well was drilled using mainly off-the-shelf equipment, and it demonstrated the viability of the process.

In the two subsequent field tests, different types of equipment were tested. Problems occurred with materials, the swivel design, cuttings removal equipment, lubrication, and galling of pipe threads. As a result of these tests, improvements were made to the equipment and to the process. A new drill string, swivel, and cuttings diverter were designed and built out of low-temperature-resistant stainless steel. Different lubricants and thread arrangements were tested. For more information on the early field tests, see Cooper and Simon (1995).

In early 1995, the basic process and equipment design began to take shape. Stainless steel equipment with tapered water well threads was used. Either PTFE lubricant or no-thread lubricant was used, with lubricants only being applied to the threaded connectors at ambient temperature. Care was taken when threading cold pipe to ensure that the threads were not damaged. A stainless steel swivel with energized graphite-filled PTFE rope packings was built for cryogenic drilling. A specially designed stainless steel cuttings diverter that could clamp on to an exposed conductor pipe with a large-diameter stainless steel exhaust line and a brush-type pipe sealing arrangement was made. The seal between the diverter and the drill pipe was made by placing a ring of coconut fiber matting in the gap, with the bristles pointing inward to contact the drill pipe. This arrangement was found to be the most effective in making a low-temperature seal against the often rough drill pipe (see Figure 4).

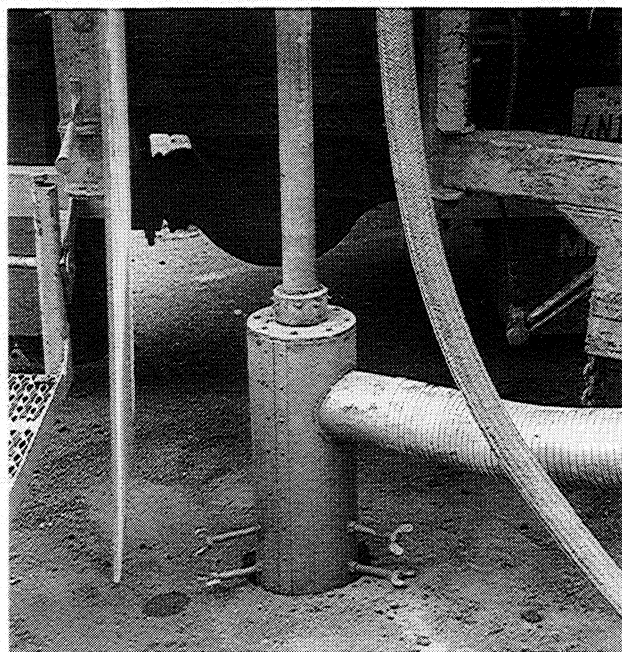


Figure 4. The cuttings diverter, with drill pipe running through the coconut brush seal and exhaust hose leading off to the right, is clamped on to the conductor casing. Note curved intake hose leading upwards to the swivel (right) and polycarbonate safety shield (left).

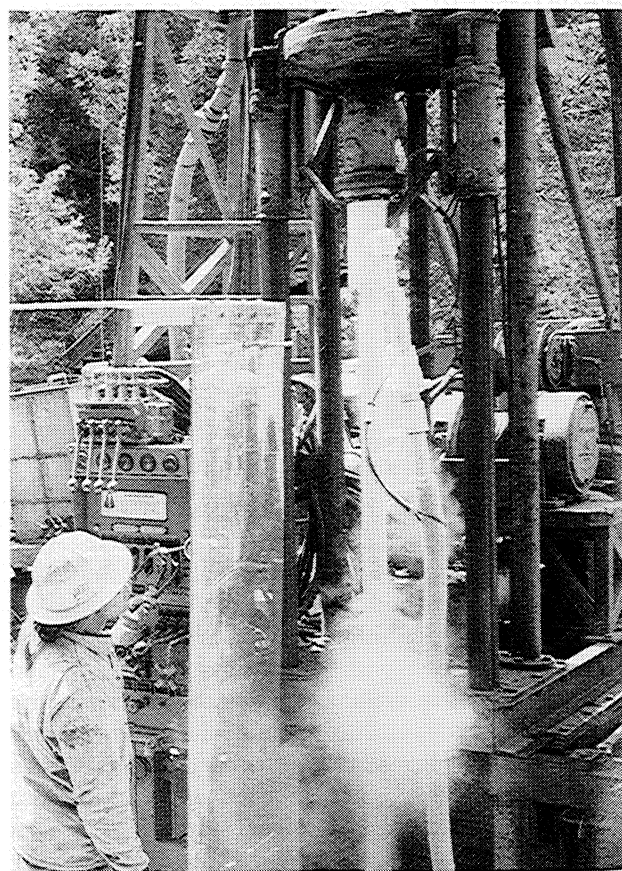


Figure 5. Drilling a soil boring using cryogenic drilling.

Soil Boring Hole

On May 5, 1995, the first successful soil boring hole was drilled. Its depth was 52 feet (16 m), and it was drilled using a 4¾-inch-diameter (12 cm) roller cone drill bit (see Figure 5). The boring was drilled into a debris flow formation that included layers of clay with boulders, sands, and gravels, as well as layers of consolidated sands. Previous drilling attempts at this site with an auger had met refusal three times at 5 feet (1.5 m), 7 feet (2 m), and 8 feet (2.5 m) upon encountering hard basalt boulders embedded in soft clay. The ground water level was found to be at 11 feet (3.5 m), but while the hole was kept frozen, the ground water was kept out. Cuttings of clay, sands, and rock were returned as fine frozen grit and sand, which were blown out of the hole without difficulty. On warming to ambient temperature, however, much of the "grit and sand" reverted to sticky clay. This would have been much more difficult to remove if a regular ambient temperature air drilling process had been used.

Split spoon samples were taken with standard equipment every 5 feet in order to provide data for the LBL site characterization project. The presence of a frozen layer on the order of 1 inch (2.5 cm) thick at the bottom of the borehole did not appear to affect the split spoon operation (although some extra blows may have been necessary to penetrate this frozen crust). Three intact 6-inch samples were recovered with each sampling run. Analytical procedures performed on the samples showed no unusual characteristics that could be attributed to the drilling process.

Total rig time for the well was more than 11 hours. Much of this was spent dealing with minor problems that are to be expected in any new process. Actual hole advancement occurred at about 20 feet per hour (6 m/hr). The hole was kept stable throughout the entire drilling process. After the boring was finished and all the samples were taken, the hole was left to thaw uncased over a weekend, since it was merely a soil boring and was not to be completed. After thawing, 30 feet (9 m) of debris was found to have sloughed into the well, and the water level had risen to 10 feet (3 m) below surface, indicating that the well might have been unstable if it had not been frozen while being drilled.

Monitoring Well

On May 8, 1995, the first successful monitoring well was drilled to 24 feet (7.5 m) with a 7⅞-inch-diameter (20 cm) roller cone drill bit. The well was drilled primarily in fractured volcanic sediments that contained a highly permeable aquifer. Total rig time for the well was approximately eight hours. The hole was advanced at about 10 feet per hour (3 m/hr). Split spoon samples were taken every 5 feet.

Difficulties were encountered in drilling through the extremely permeable fast flowing aquifer in the fractured material. At times, water entered the well when drilling and sampling. This resulted in water freezing to

the borehole wall, drill pipe, and to the bit, leading to a stuck bit (see Figure 6). However, using a variety of techniques, the water was removed from the well, and drilling continued to a proper completion depth. To do this, the drilling rate had to be slowed to less than 5 feet per hour (1.5 m/hr) so that the borehole wall was kept frozen in order to prevent the ground water from entering the well (see Figure 7). We believe that many of the problems with water influx are solvable and that once we have made some improvements to the technique, we should be able to drill under the water table in many cases. However, it should be noted that the present primary use for cryogenic drilling is for vadose zone drilling in semi-arid sites with deep water tables.

Costs

The two main operating expenses of cryogenic drilling are nitrogen-related expenses and drill rig costs. The rental for the nitrogen tanker was \$250 per day, and the cost of the liquid nitrogen was about \$280 per well (750 liters at \$.37 per liter). The rental for the Mobile Drill B61 and rate for the two drillers amounted to \$145/hr. The nitrogen charges were partially offset in that the rig rate was cheaper than the \$220/hr normally charged to drill boreholes in this geology because a simpler drill rig was able to be used since a casing driver and an air compressor were not necessary.

Overall, however, the cryogenically drilled holes took longer to drill than if conventional technology had been used. This is to be expected since this was an experimental process. The drilling costs should fall as the drilling method is perfected, drillers become more



Figure 6. Drill bit covered with frozen mud after water invaded the borehole.

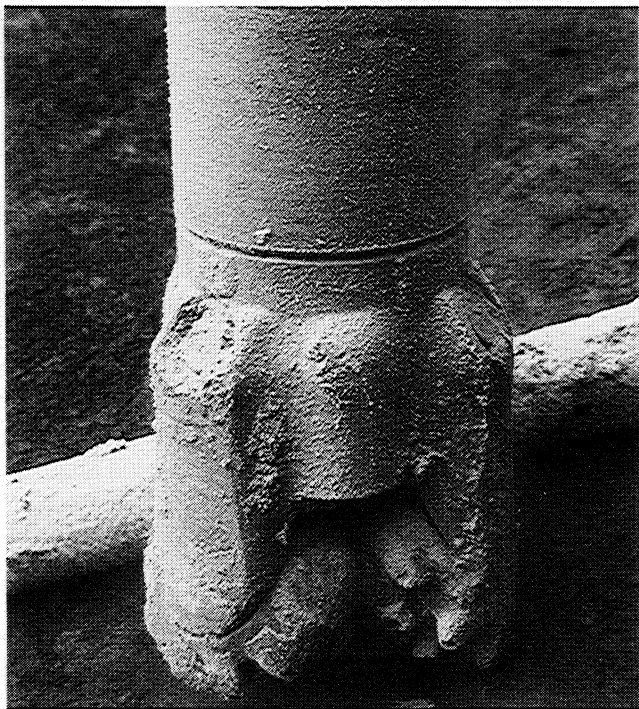


Figure 7. The same bit after properly drilling the next section of hole.

familiar with the nitrogen equipment, and the time to drill the wells is shortened.

Future Work

Future cryogenic drilling tests will be performed with larger and/or more versatile drill rigs. They will include the drilling of slant wells and vadose zone drilling in highly unstable sand and boulder geologies. Cuttings containment systems that are compatible with cryogenic drilling are also being investigated.

Research is also being performed on the development of a cryogenic coring technique that is complementary to the cryogenic drilling process. Cryogenics have been used in the past to recover intact samples of unconsolidated sediments in order to examine strength and liquefaction potentials. Standard practice involves driving a spiked cylindrical pipe into the ground, circulating liquid nitrogen in the pipe to freeze the surrounding soil, and then either coring the frozen ground with conventional coring equipment or using a powerful crane to remove the cylindrical pipe and the surrounding soil that has frozen on to it (Goto et al. 1992; Hatanka et al. 1988). Cryogenic coring has the potential to retrieve samples that more accurately reflect the geology than current coring techniques. In addition, with frozen cores, a point-by-point fluid analysis can be performed on cores that have not been disturbed or compacted during the coring process.

Furthermore, cryogenic drilling is possibly the only nonmud-based drilling technique that allows for well completion in an open (uncased) borehole in unstable ground. This may allow for open hole logging techniques such as caliper and induction logs to be used. Also, innovative completion technologies such as

SEAMIST™ (Science and Engineering Associates Membrane Instrumentation and Sampling Technique) cannot be installed easily in wells with temporary casing in place. This is because SEAMIST, which uses an impermeable tubular membrane with various ports for sampling and conducting downhole tests at discrete intervals, is deployed in a borehole by inversion under pneumatic pressure and must seal directly against the borehole wall (Lowry and Keller 1992).

Summary of Results

The field tests conducted have demonstrated that cryogenic drilling can be used to drill boreholes in sands, clays, gravels, and rock. The method is especially useful for drilling under conditions of alternating hard material and soft unconsolidated material, such as one might find in a sandy zone with dispersed cobbles and boulders or in a geology of alternating hard and soft beds, such as is encountered at INEL. Cryogenic drilling also has been shown to work well in the vadose zone and in low-permeability aquifers. There are limitations to drilling in high-flow aquifers, but the method is primarily targeted at sites such as Hanford, Sandia, and INEL where most of the drilling is above the water table.

Acknowledgments

This work was carried out for the Department of Energy, Office of Environmental Management, Office of Technology Development, through the Berkeley Laboratory under contract number DC-AC 03-76 SF 00098.

References

- Barrow, J. 1994. The resonant sonic drilling method: An innovative technology for environmental restoration program. *Ground Water Monitoring and Remediation* 14, no. 2: 153-160.
- Cooper, G.A., and R.D. Simon. 1995. Field test of the cryogenic drilling method for environmental well installation. Paper read at the ASME Energy Sources Technology Conference, 29 Jan.—Feb. 1, at Houston, Texas.
- Department of Energy. 1995. 1995 baseline environmental management report. DOE/EM-0232. U.S. DOE, Office of Environmental Management.
- Goto, S., Y. Suzuki, S. Nishio, and H. Oh-oka. 1992. Mechanical properties of undisturbed Tone River gravel obtained by in situ freezing method. *Soils and Foundations* 32, no. 3: 15-25.
- Hatanka, M., Y. Suzuki, T. Kawasaki, and M. Endo. 1988. Cyclic undrained shear properties of high-quality undisturbed Tokyo gravel. *Soils and Foundations* 28, no. 4: 57-68.
- Herrick, D. 1993. The drill through casing driver. *Water Well Journal* 47, no. 10: 56-60.
- Kirby, S.W., and M. Savage. 1992. Comparative analysis of three drilling methods. Paper read at the Federal Environmental Restoration Conference and Exhibition, 15-17 April, at Vienna, Virginia.
- K & M Engineering. 1993. Evaluation of alternative drilling technologies and subsurface confinement barriers for single

shell tanks at Hanford. DE-AC21-90MC 27346. Morgantown, West Virginia: U.S. DOE, Morgantown Energy Technology Center.

Kramer, S., W. McDonald, and J. Thomson. 1992. *An introduction to trenchless technology*. New York: Van Nostrand Reinhold.

Lowry, W., and C. Keller. 1992. Development of the SEAMIST[®] concept for site characterization and monitoring. DOE/CH-9213. Washington, D.C.: Office of Research and Development, Technology Department, Environmental Restoration and Waste Management, U.S. Department of Energy.

Murphy, J. 1991. Application of ODEX drilling method in a variably fractured volcanic/igneous environment. Paper read at the 5th National Outdoor Action Conference on Aquifer Restoration, Ground Water Monitoring, and Geophysical Methods, 13-16 May, at Las Vegas, Nevada.

Simon, R., and G.A. Cooper. 1994. Use of cryogenic fluids for environmental drilling in unconsolidated formations. Paper read at ASME Energy Sources Technology Conference, 23-26 Jan., at New Orleans, Louisiana.

Veranneman, G., and D. Rebhan. 1979. Ground consolidation with liquid nitrogen. *Engineering Geology* 13, no. 1: 473-484.

Biographical Sketches

Rafael Simon (595 Evans Hall, UC Berkeley, Berkeley, CA 94720) received his Ph.D. in the Department of Materials Science and Mineral Engineering in 1996. He has studied various types of environmental drilling methods and has been working on cryogenic drilling since January 1992.

George Cooper (595 Evans Hall, UC Berkeley, Berkeley, CA 94720) graduated from Cambridge University in 1967 with a Ph.D. in materials science. He has spent most of his career in industrial research, working both as a scientist and a manager, often in the fields of rock drilling, mining, and tunneling, and working for companies such as Atlas Copco and Schlumberger. In 1988 he became a full professor at University of California at Berkeley, where he is the head of the Petroleum Engineering Program.

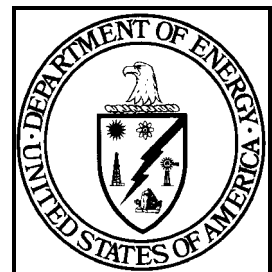
More information on the authors and on cryogenic drilling can be found on the World Wide Web at [HTTP://www.mse.berkeley.edu/faculty/cooper/cryodrilling](http://www.mse.berkeley.edu/faculty/cooper/cryodrilling)

Editor's Note: The use of brand names in peer-reviewed papers is for identification purposes only and does not constitute endorsement by the authors, their employers, or the Ground Water Publishing Co.

Bijlage 3 Report U.S. Department of Energy

Cryogenic Drilling

**Subsurface Contaminants
Focus Area**



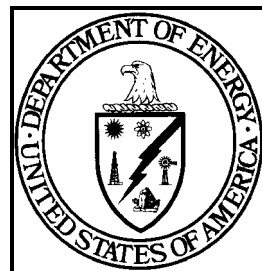
Prepared for
U.S. Department of Energy
Office of Environmental Management
Office of Science and Technology

October, 1998

Cryogenic Drilling

OST Reference # 155

**Subsurface Contaminants
Focus Area**



Demonstrated at
Lawrence Berkeley National Laboratory
Berkeley, California



Purpose of this document

Innovative Technology Summary Reports are designed to provide potential users with the information they need to quickly determine if a technology would apply to a particular environmental management problem. They are also designed for readers who may recommend that a technology be considered by prospective users.

Each report describes a technology, system, or process that has been developed and tested with funding from DOE's Office of Science and Technology (OST). A report presents the full range of problems that a technology, system, or process will address and its advantages to the DOE cleanup in terms of system performance, cost, and cleanup effectiveness. Most reports include comparisons to baseline technologies as well as other competing technologies. Information about commercial availability and technology readiness for implementation is also included. Innovative Technology Summary Reports are intended to provide summary information. References for more detailed information are provided in an appendix.

Efforts have been made to provide key data describing the performance, cost, and regulatory acceptance of the technology. If this information was not available at the time of publication, the omission is noted.

All published Innovative Technology Summary Reports are available on the OST Web site at <http://OST.em.doe.gov> under "Publications."

TABLE OF CONTENTS

1	SUMMARY	page 1
2	TECHNOLOGY DESCRIPTION	page 4
3	PERFORMANCE	page 7
4	TECHNOLOGY APPLICABILITY AND ALTERNATIVE	
5	TECHNOLOGIES	page 11
6	COST	page 14
7	REGULATORY AND POLICY ISSUES	page 18
8	LESSONS LEARNED	page 20

APPENDICES

A	References
---	------------

SECTION I

SUMMARY

Technology Summary

Problem

Environmental drilling is used to conduct site investigations and to install monitoring and remediation wells. Employing conventional drilling techniques to conduct environmental investigations in unconsolidated soils can result in borehole collapse and may also lead to cross-contamination of aquifers and soil formations. For investigations in certain geologic conditions, there are currently no viable conventional drilling techniques available.

How it works

Cryogenic drilling improves upon conventional air rotary drilling by replacing ambient air with cold nitrogen (either liquid or gas) as the circulating medium (see Figure 1). The cold nitrogen gas stream freezes moisture in the ground surrounding the hole. The borehole wall is stabilized by freezing as drilling occurs, using nitrogen gas as cold as -320°F (-196°C). The frozen zone prevents the collapse of the hole and prevents the movement of groundwater or contaminants through and along the hole. In addition, cryogenic drilling enables the drilling of boreholes in ground that has not previously been accessible.



Figure 3.
Cryogenic
Drilling in
Operation

Advantages over baseline

In addition to providing borehole stability and preventing contaminant transport through and along the borehole, the cryogenic drilling method:

- Eliminates the need for installation and removal of a casing to stabilize the borehole;
- Allows the drilling of a smaller diameter borehole since a casing isn't required;
- Minimizes investigation-derived wastes;
- Is environmentally benign—nitrogen gas is inert and nonexplosive;
- Can produce more representative samples;

- Enables the drilling of boreholes in areas and in ground that have not previously been accessible;
- Results in improved cutting and reduces trouble time associated with drilling in difficult materials;
- Allows for open-hole completions—the hole can remain open and frozen as long as is necessary—before a permanent well casing is installed or for logging or other purposes;
- Causes only temporary formation damage—full permeability is restored upon thawing;
- May reduce monitoring well development time; and
- Requires minimal equipment modifications to existing drill rigs.

Development Summary

Low-temperature fluids have been used to freeze soil since the end of the 19th century, but they have been used mainly for either temporary ground support or groundwater control. Cryogenic drilling has been developed as a technique to stabilize the borehole and prevent cross-contamination during drilling.

- Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), Earth Science Division, and the University of California at Berkeley developed the cryogenic drilling technique by modifying a standard top-drive rotary rig. Using off-the-shelf equipment, the developers designed a method of introducing nitrogen into the drill pipe just below the drive head.
- Field demonstrations of the cryogenic drilling technology were conducted in May 1994, May 1995, May 1996, and September 1996. Demonstrations took place at LBNL in May 1994 (two demonstrations) and in May 1995; at the Aerojet Site in Rancho Cordova, California, in May 1996; and a slant hole was drilled at LBNL in September 1996.
- Cryogenic drilling is not commercially available, but it can be assembled from off-the-shelf components plus a special drill string and swivel. No company currently provides cryogenic drilling as part of its services.
- Cryogenic drilling technology is being developed further to obtain quality core samples. Since the technology freezes the soil particles in place and prevents introduction of foreign material into successive layers of an excavation, it could be used to obtain samples that are truly representative of a formation.

Contacts

Technical

Dr. George Cooper, Principal Investigator, Department of Material Science and Mineral Engineering, 595 Evans Hall, University of California, Berkeley, California 94720, (510) 642-2996, e-mail: gcooper@socrates.Berkeley.edu

Management

Jim Wright, DOE Subsurface Contaminants Focus Area Program Manager, (803) 725-5608

More information on cryogenic drilling can be found on the Internet at <http://www.mse.berkeley.edu/faculty/cooper/cryodrilling/cryodrilling.html>.

Other

All published Innovative Technology Summary Reports are available online on the DOE Office of Science and Technology (EM-50) web site at <http://ost.em.doe.gov/IFD/OSThome.htm>. The Technology Management System, also available through the EM-50 web site, provides information about OST programs, technologies, and problems. The Tech ID for Cryogenic Drilling is 155.



SECTION 2

TECHNOLOGY DESCRIPTION

Overall Process

System configuration

- Cryogenic drilling uses a conventional, top-drive, rotary drill rig modified by the addition of a side-entry swivel to allow introduction of cold nitrogen (gas or liquid) about a foot below the drive head (see Figure 2). Special cold-resistant drill pipe may also be necessary.
- Nitrogen is supplied by a pressurized tank or from a pumper truck capable of delivering nitrogen at a variety of temperatures, flow rates, and pressures. This equipment is commercially available.
- A special diverter carries the exhaust nitrogen and drilled cuttings away from the drilling area.
- Only the nitrogen supply hose, swivel, drill pipe, drill bit, air return diverter, and exhaust hose contact the low-temperature fluid. A special drill string and swivel must be made from stainless steel or other alloy that does not become brittle at low temperatures, and must be fitted to the rig. In addition, the bit crossover sub is fitted with back-cutting teeth for reaming the hole.

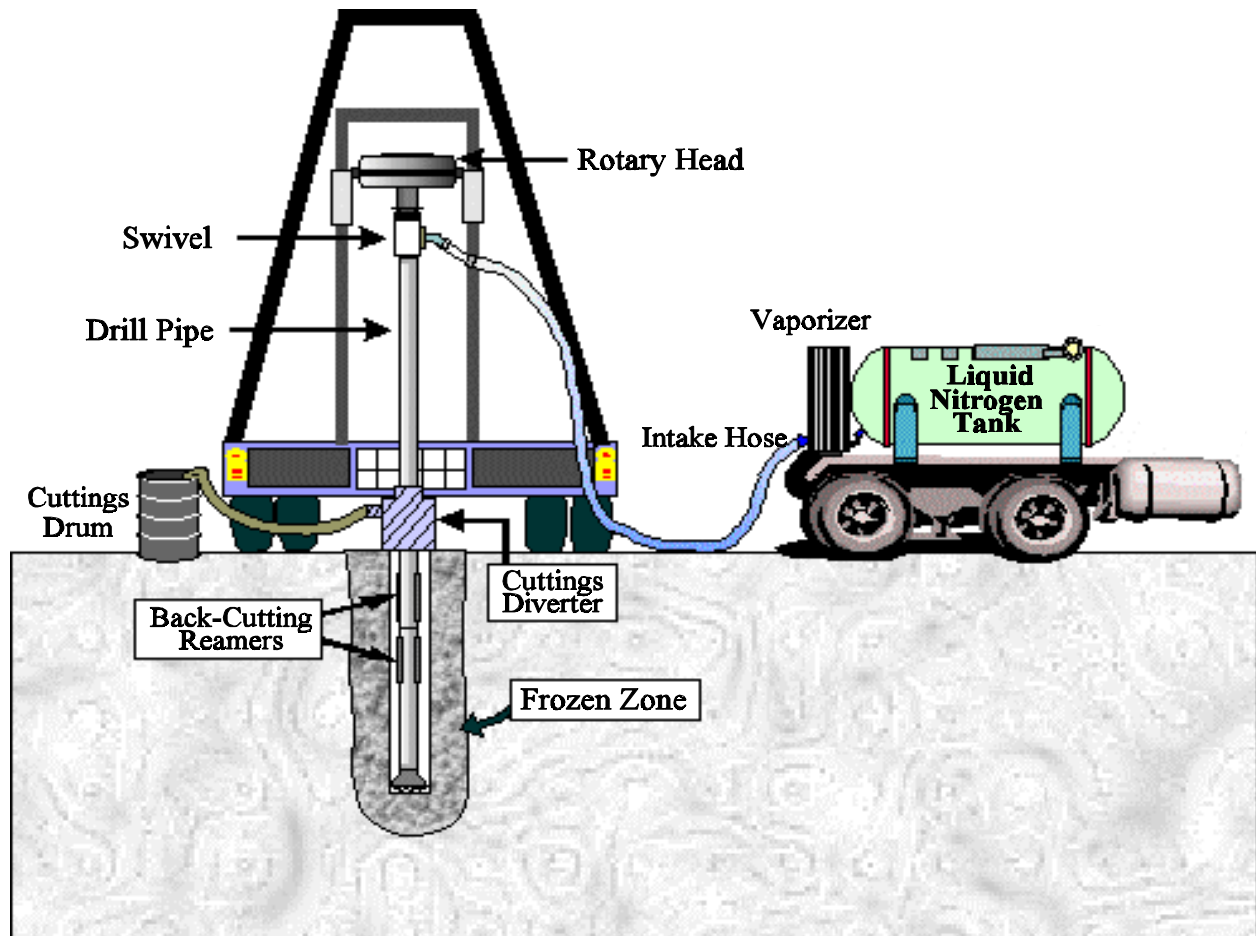


Figure 4. Liquid nitrogen tanker with vaporizer unit attached to the completed drilling assembly.

Process description

- The nitrogen descends the drill pipe and exits the drill bit, typically a conventional roller cone or drag bit, and blows the cuttings to the surface through the borehole annulus in the usual manner of an air drilling operation.
- The cold nitrogen gas stream freezes moisture in the ground surrounding the hole. The borehole wall is stabilized by freezing while drilling, using nitrogen gas as cold as -320°F (-196°C). The frozen zone prevents the collapse of the hole and prevents the movement of groundwater or contaminants along the hole. The solidified ground at the drill bit also results in improved cutting of rubble and other difficult material.
- Nitrogen pressures and flow rates required for cryogenic drilling are determined in the same manner that air pressures and flow rates are determined for air rotary drilling of a similar size borehole. If a pressure less than 200 pounds per square inch (psi) is required, a pressurized nitrogen tank will be adequate. If pressures higher than 200 psi are required, then a pumping unit capable of delivering nitrogen at a variety of temperatures, flow rates, and pressures will be needed.
- Drill string removal is aided by back-cutting teeth for reaming the hole on the bit crossover sub. This is especially helpful when high soil moisture content has caused the frozen borehole to expand.
- When the hole is allowed to warm up, the ground returns to its original condition.
- Thawing time depends on formation type, water content, permeability, and freezing time. In practice, thawing time has averaged 1 to 4 hours.

System Operation

Capabilities and limitations

- The borehole is stabilized during drilling by freezing, and without the need for a casing or a drilling fluid such as mud. The method is particularly useful for drilling in unstable soils and for directional drilling.
- Cryogenic drilling can be used in soils with as low as 2 percent moisture content.
- Cost appears to be the primary limiting factor on a practical maximum depth using cryogenic drilling, as nitrogen costs increase with depth. Technical depth limitations are comparable to those encountered with air rotary drilling.
- The technique can increase effectiveness of cutting and rate of penetration in difficult ground such as rubble or sticky clays.
- Continuous operation may be required with cryogenic drilling, since interruption in the application of nitrogen for an extended period may allow the borehole wall to thaw and collapse. Temporary interruption to the nitrogen flow, for example, when making drill pipe connections, generally causes no problems.
- Cryogenic drilling works well in the vadose zone and in low-flow aquifers. Limitations will occur in high-flow aquifers, such as those found in fractured rock, because of the difficulty in adequately freezing the borehole wall under high-flow conditions.
- Subsurface samples may be more representative than samples collected with other drilling techniques for several reasons: Nitrogen is inert and no other liquids are introduced into the borehole, freezing prevents contaminant migration through and along the borehole, and the cold temperature can help to preserve any volatile contaminants that may be present.



Investigation-derived waste and decontamination issues

- The secondary waste is of a similar amount and composition to that of standard air drilling, given a similar borehole size. Since no casing is required with cryogenic drilling, however, it allows for the use of a smaller borehole, thereby generating less drill cutting waste than with cased methods.
- Storage facilities similar to those for standard air drilling are required for secondary waste.
- Decontamination requirements are similar to those for standard air drilling.

Worker safety

- A 3/8-inch-thick polycarbonate sheet is used as a shield between the driller and the drill string.
- The drillers wear pants, goggles, and long-sleeved clothing to protect their skin from leakage of cold gas or liquid nitrogen.
- Cryogenically-insulated leather work gloves are used for pipe handling.
- The cold temperature of the cuttings can reduce the volatility of some contaminants present.
- Emergency respiratory equipment is not necessary.
- Workers who are responsible for handling or transportation of nitrogen must be knowledgeable of applicable regulations.



SECTION 3

PERFORMANCE

Demonstration Overview

Cryogenic drilling was demonstrated five times between May 2, 1994 and September, 1996 (see Tables 1, 2, 3, 4, and 5). The technology was demonstrated four times at LBNL in Berkeley on May 2 and May 21, 1994; in May 1995; and in September 1996. On May 7–8, 1996, cryogenic drilling was demonstrated at the Aerojet Site in Rancho Cordova, California, near Sacramento.

Equipment

- The field tests were conducted using Mobile Drill B-61 and Mobile Drill B53 HDX auger rigs mounted on Ford truck chassis equipped with the nitrogen supply swivel, a conventional bit, and standard pipe. Figure 3a shows a drill rig in auger configuration before modifications have been made. Figure 3b shows the rig modified for cryogenic drilling.
- Nitrogen gas at -125°C (-190°F) and 80 psi was supplied from a pumper truck. A 2,000-gallon mobile pumping unit capable of delivering nitrogen at a variety of temperatures, flow rates, and pressures was used to deliver 99.99 percent pure nitrogen gas to the drill rig. A stainless steel hose connected the tanker outlet to the swivel inlet.
- Modifications and improvements have been made to the equipment since the first demonstration. Some of these improvements include the addition of a purpose-built diverter for drill cuttings, the use of beryllium copper taper threads and the elimination of pins in the pipe connector, the addition of back-cutting teeth on the bit crossover sub for reaming, and 5-ft. stainless steel drill pipe.

Table 1. Demonstration Results, Lawrence Berkeley National Laboratory, May 2, 1994

Geologic features	Sand, gravel, and clay layers
Borehole size	17-ft deep, 3.5-in diameter
Equipment modifications	N/A
Total drilling time	6 hours, including time for positioning equipment, converting drill rig from auger to cryogenic roller-cone setup, installing safety equipment, drilling, and reconverting to auger configuration.
Average rate of penetration	5 ft/hour
Nitrogen flow rates	100 to 200 ft ³ /min
Nitrogen used	30,000 ft ³ (roughly 325 gal in liquid form)
Results	No problems encountered during drilling.



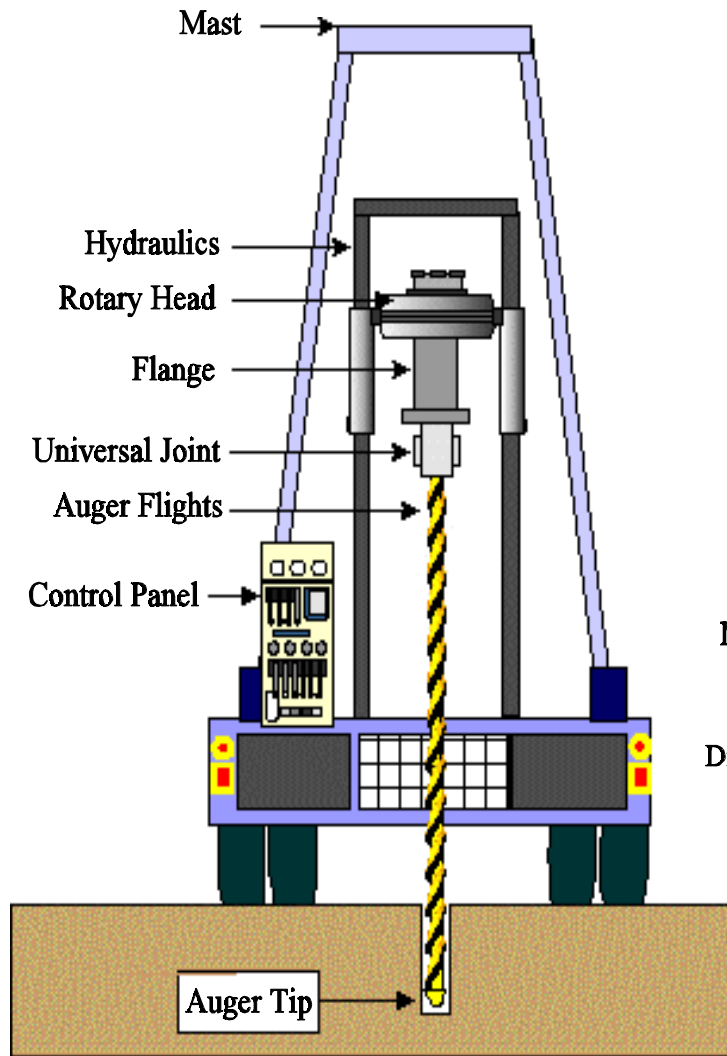


Figure 5a. Drill rig in auger configuration.

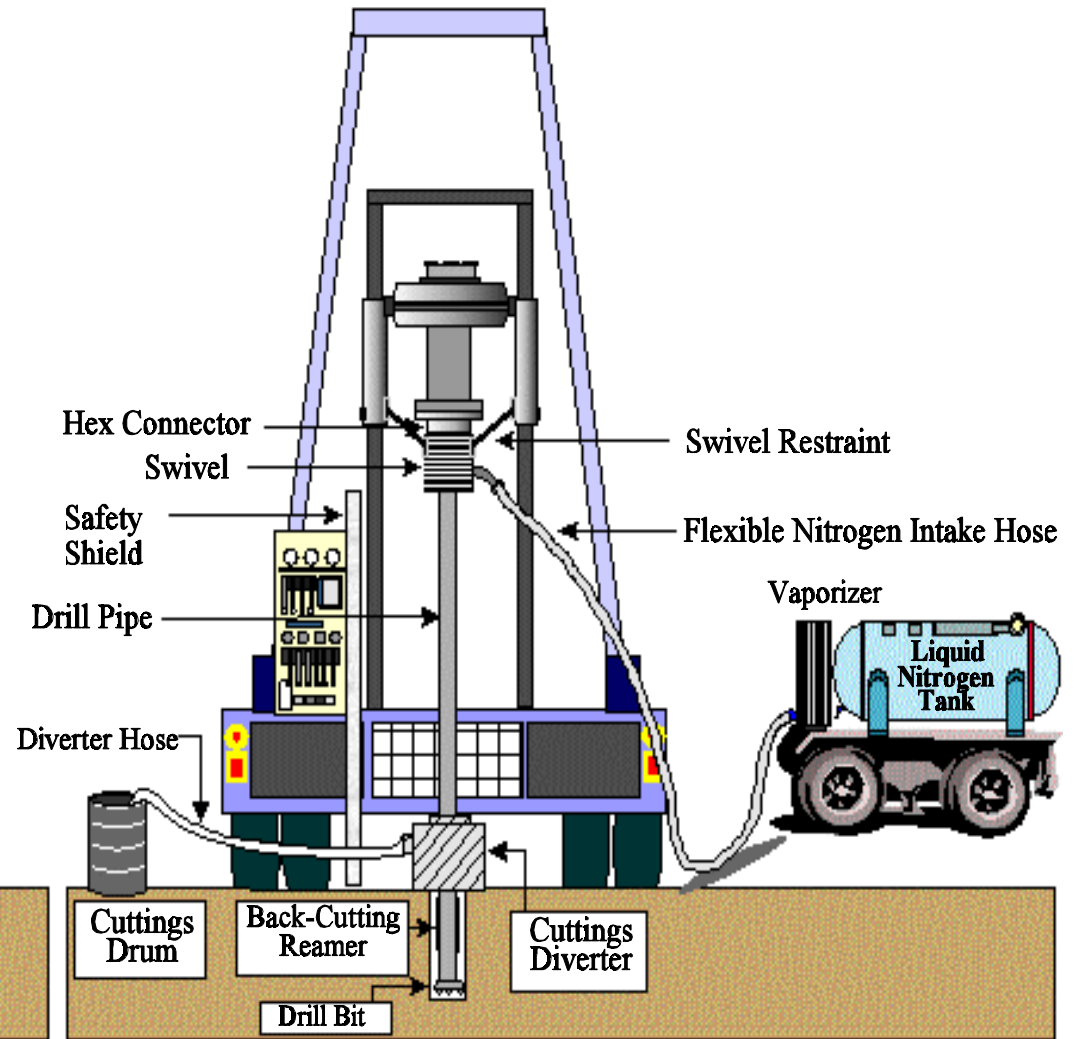


Figure 3b. Drill rig in cryogenic drilling configuration.

Table 2. Demonstration Results, Lawrence Berkeley National Laboratory, May 21, 1994

Geologic features	A series of loosely consolidated volcanic sediments, including some clay layers
Borehole size	8-ft deep, 7 $\frac{7}{8}$ -in diameter
Equipment modifications	The same equipment as was used in the first field test, except for a larger drill bit and a new purpose-built diverter. The diverter was designed to carry the exhaust nitrogen and drilled cuttings from the drilling area to reduce further the possibility of worker exposure to cold temperatures.
Total drilling time	1 day
Average rate of penetration	N/A
Nitrogen flow rates	300 to 700 ft ³ /min
Nitrogen used	N/A
Results	• Initial drilling operations were successful and occurred as expected. • Drilling was discontinued at a depth of 8 ft because of a failure in the uppermost joint of the drill pipe. The failure was attributed to excessive wear from previous drilling and exposure to extremely cold temperatures. • The diverter and the swivel functioned as expected.

Table 3. Demonstration Results, Lawrence Berkeley National Laboratory, May 1995

Geologic features	The upper section consisted of approximately 12 ft of clay with boulders, underlain by a series of sands and sandy clays. The water table was at approximately 10 ft.
Borehole size	52-ft deep, 4.75-in diameter
Equipment modifications	A 4.75-in diameter roller-cone drill bit was used. Also used stainless steel drill pipe, rectangular threads, and stainless steel and bronze connectors.
Total drilling time	11 hours
Average rate of penetration	20 ft/hour
Nitrogen flow rates	200 to 700 ft ³ /min
Nitrogen used	N/A
Results	• The target depth of 52 ft was accomplished; conventional auger equipment had failed in three previous attempts at 5, 7, and 8 ft because the auger had been unable to penetrate the boulders. • Groundwater was encountered at 11 ft, but it did not enter the hole because the nitrogen froze it outside the hole. • Good-quality split spoon samples were recovered every 5 ft from the dry, frozen hole. • After the soil thawed, 30 ft of debris sloughed into the borehole, and the water level rose to 10 ft below the surface. This indicates that the borehole might have been unstable if it had not been frozen while being drilled.



Table 4. Demonstration Results, Aerojet Site, May 7–8, 1996

Geologic features	Semiarid, alluvial, unconsolidated, sedimentary formation. The geology provided new challenges of rough drilling in a sandy soil matrix containing cobbles and boulders, which identified both strengths and weaknesses in the current cryogenic drilling equipment.
Borehole size	80.5-ft deep, 4.75-in diameter
Equipment modifications	New diverter, stainless steel cutting pipe, beryllium copper taper threads (pinned rectangular threads as a retrofit to old pipes), and a single-blade cutting tooth on the bit crossover sub for reaming.
Total drilling time	11 hours over 2 days
Average rate of penetration	10 ft/hour
Nitrogen flow rates	The use of nitrogen gas increased steadily with depth. Increased nitrogen flow rates at 30, 60, and 80 ft were necessary to lift larger cuttings out of the hole.
Nitrogen used	395,000 ft ³ (15,800 liters of liquid nitrogen)
Results	- An 80.5-ft deep, 4.75-in diameter borehole was drilled, falling short of the target depth by 19.5 ft. Drilling was stopped because the hex swivel shaft failed as a result of rough conditions. The attained depth, however, was 28.5 ft deeper than was previously achieved with the cryogenic technique. - Three pin failures occurred in the beryllium copper/stainless steel-pinned, pipe-joint connections. (Redesign eliminated this problem in future tests.) - Swivel nitrogen temperature and pressure variations with depth were noted.

**Table 5. Slant Hole Demonstration Results, Lawrence Berkeley National Laboratory
September 1996**

Geologic features	The boring was drilled into the Orinda Formation, consisting of pebbles, cobbles, and boulders up to 1 ft in diameter.
Borehole size	37-ft deep, 4.75-in diameter, (30 degree slanted)
Equipment modifications	Totally redesigned swivel with a larger drive shaft and hex connection, pins eliminated from pipe connections, taper threads, 5-ft pipes (cut from 10-ft), three back-cutting blades on the bit crossover sub for reaming.
Total drilling time	4 hours during a 10-hour work day
Average rate of penetration	9.25 ft/hour
Nitrogen flow rates	The pressure ranged from 60 to 150 psi while drilling. Flow rates were between 280 and 800 ft ³ /min.
Nitrogen used	150,000 ft ³
Results	- The aquifer that was encountered was frozen, stabilized, and penetrated. - Cryogenic drilling equipment was adapted easily to the Mobile Drill B53 rig. - The slant hole was drilled successfully, with only minimal training of the drilling crew. - Sample recoveries (using conventional split-spoon sampler) ranged from good quality to very poor; occasionally no penetration of the sampler in hard formation.

SECTION 4



TECHNOLOGY APPLICABILITY AND ALTERNATIVES

Technology Applicability

Cryogenic drilling offers solutions to several problems commonly encountered in environmental investigations. Compared to conventional drilling techniques, cryogenic drilling can produce more representative sampling of subsurface solids and fluids, while minimizing the potential for cross-contamination, avoiding the introduction of drilling fluids such as mud into the borehole, and reducing the amount of investigation-derived waste. Cryogenic drilling may also reduce development time for monitoring wells, since the method leaves the formation surrounding the borehole virtually intact. In many situations, the advantages that cryogenic drilling offers over conventional drilling techniques will make it a superior choice for environmental drilling. Under certain site conditions, cryogenic drilling may even be the only viable drilling method.

Cryogenic drilling works well in sands, clays, gravels, and rock. It is particularly appropriate for sites with difficult drilling conditions such as loose sands, gravels, cobbles, and boulders or alternating layers of clay with unstable soils. Cryogenic drilling can also be very useful in providing borehole stability when directional drilling is required. The method solidifies the ground at the drill bit, not only stabilizing the borehole, but also improving the cutting effectiveness and rate of penetration in sticky clays or other viscous materials, which are rendered brittle by the cold temperature.

The technique has been used successfully in the vadose zone and in low permeability aquifers. Laboratory tests indicate that cryogenic drilling should be possible even in dry, arid sites with soil moisture content as low as 2 percent. This minimum moisture content is required to insure adequate strength of the frozen soil. Cryogenic drilling will have limitations in certain high-flow aquifers, however, due to the difficulty in ability to freeze the larger volume of water.

Cryogenic drilling can produce more representative environmental samples than competing technologies. With cryogenic drilling, no formation-altering liquids are introduced into the borehole. Nitrogen, which is environmentally inert, is used as the circulating medium. Because the method prevents cross-contamination between layers of soil, it can be used to obtain representative core samples, especially microbiological samples. In addition, the cold temperatures used can preserve any volatile contaminants.

Potential markets

Difficult drilling conditions are found at U.S. Department of Energy sites at Sandia National Laboratories near Albuquerque, New Mexico; Hanford near Richland, Washington; and Idaho National Engineering and Environmental Laboratory near Idaho Falls, Idaho, where there are areas with loose sands, gravels, and boulders and where the water tables tend to be relatively deep. If using conventional drilling techniques under such conditions of unstable soils, the increased depth of an open borehole can result in an increased risk of contaminating the deep groundwater. Cryogenic drilling at these sites would stabilize the loose soils during drilling without the injection of a drilling fluid such as mud, thereby minimizing the environmental impact of drilling.

Site conditions

- Cryogenic drilling is most appropriate for sites that contain unconsolidated sands and gravel that are difficult to drill by other methods.
- The technique is useful for drilling through alternating hard and soft layers, such as sandy zones with alternating layers of cobbles and boulders (see Figure 4).
- A 2 percent minimum soil moisture content is required to ensure adequate strength of the frozen soil.



- At sites with deep water tables, where conventional drilling techniques can increase the risk of introducing contamination to the groundwater, cryogenic drilling offers the advantage of building frozen walls that prevent movement of groundwater or contaminants through and along the hole.
- Limitations will occur when drilling below the water table in highly permeable formations because of the excessive water influx and the inability to adequately freeze the soil.



Figure 6. A cryogenic drilling site. Large boulders in the subsurface, visibly exposed in the trench in the foreground, do not present a drilling challenge using this technique.

Competing Technologies

Competing conventional drilling technologies include cable tool, hollow-stem auger, mud rotary, dual-wall percussion hammer, dual-tube reverse circulation, and air rotary casing hammer. Cryogenic drilling will compare favorably to these other techniques when certain site conditions and monitoring program objectives are considered.

Cryogenic drilling has competitive advantages over casing driver rigs, which install casings to stabilize boreholes. The necessity of installing and removing casings contributes to the total time of drilling and, therefore, increases the cost of drilling operations.

Cryogenic drilling may reduce the time for monitoring well development because the method leaves the formation surrounding the borehole virtually intact. For this same reason, it can also produce more representative samples than are obtained with other methods. All competing technologies may allow cross-contamination of the hole, change *in situ* porosity and permeability, and introduce inaccuracies in sampling. Cryogenic drilling appears uniquely able to recover biologically unaltered material.

Some of the other disadvantages of competing technologies include the following:

- Technologies that require the introduction of fluids to the subsurface for borehole stability will risk regulatory and community acceptance due to their potential to alter the formation;
- When used at environmental restoration sites, the volume of investigation-derived waste that is contaminated can be significant with many of the other methods; and
- Difficult site conditions, such as layers of loose sand, negatively impact the cost of using these other technologies.

The only disadvantages specific to cryogenic drilling include the need to provide the nitrogen supply, and the requirement for a special swivel and cold-resistant drill pipe. Some other issues related to specific competing technologies include the following:

- **Cable tool**
Advantage: Can penetrate almost any formation.
Disadvantages: Slow; causes local compaction around the hole.
Difficult to obtain undisturbed sample.
- **Hollow stem auger**
Advantage: Allows sampling through the auger, which supports the hole.
Disadvantages: Has difficulty in handling unstable soils, particularly flowing sands.
Cannot penetrate hard rock or cobbles.
- **Mud rotary**
Advantage: Can penetrate almost any formation.
Disadvantages: Equipment is bulky, and mud can be invasive, causing extensive formation alteration. Mud disposal may be expensive, particularly if contaminated.
- **Dual-wall percussion hammer**
Advantage: May be rapid under favorable conditions.
Disadvantage: May cause heating and/or compaction of the sample.
- **Dual tube reverse circulation**
Advantage: Casing supports hole wall.
Disadvantages: May have problems with recovering temporary casing; expensive.
- **Air Rotary Casing Hammer**
Advantage: Casing supports hole while drilling.
Disadvantages: May not penetrate hard rock or cobbles; may cause difficulties in retrieving casing; expensive.



SECTION 5

COST

Introduction

Cryogenic drilling can offer competitive advantages over conventional drilling techniques when certain site conditions and monitoring objectives exist. While cryogenic drilling can offer cost savings compared to conventional techniques, in many cases the cost of cryogenic drilling is higher than it is for other competing technologies. There are situations where cryogenic drilling will be the preferred technique, however, because the other technologies are not able to achieve the same level of success. Cryogenic drilling is most appropriate at sites with severely unconsolidated soils, where conventional drilling is tedious or impossible and hole stabilization is difficult.

Cost Analysis

Costs associated with cryogenic drilling that are not incurred with other drilling methods include capital costs to convert a conventional drill rig and operational costs for the nitrogen supply. Depending on site conditions, some or all of these costs may be offset by savings realized from the advantages of cryogenic drilling. When using cryogenic drilling in unconsolidated soils, for example, some costs can be reduced compared to competing drilling techniques because no casing is needed to stabilize the borehole. Not only are costs associated with driving and removing casing then eliminated, but drill rig costs (including the cost of personnel) and disposal of investigation-derived waste may be reduced because a smaller borehole can be drilled. Cryogenic drilling can also save costs by reducing trouble time that may be encountered with other technologies when drilling in difficult materials. In addition, for monitoring wells, development time may be reduced compared to other methods because the formation surrounding the borehole is unaltered.

Due to the variability of the cost of alternative drilling methods, the following considerations must be evaluated for a true cost comparison to be made:

- Site conditions;
- Monitoring or assessment program objectives;
- Regulatory constraints; and
- Availability of equipment and supplies.

Capital Costs

Capital costs associated with adapting a conventional drilling system for cryogenic drilling result from modifications to the rig for the introduction of nitrogen and special equipment that is needed for drilling at cold temperatures. Modifications to specific drill rigs typically cost under \$1,000 and are generally limited to pipe-connecting tools, a swivel mounting system, and a safety shield to protect the drillers from the cold nitrogen gas. Special equipment costs can run between \$10,000 and \$15,000. These usually include a new swivel, drill pipe, and cuttings diverter, all of which must perform at low temperatures. The costs can be offset by the reduced time that is required to drill the well, principally because of improved cutting rates and the reduction in trouble time associated with borehole collapse.

Operational Costs

Operational costs for the nitrogen supply are associated with mobilization of the nitrogen tank system, tank rental, the amount of nitrogen used, and personnel required to operate the supply system.

- Liquid nitrogen is commercially available in tonnage quantities and can be delivered to most sites by road tanker. See Tables 6, 7, and 8 for actual and estimated costs for mobilization of the nitrogen tank system to the site.



- The liquid nitrogen costs from 30 to 70 cents per 100 standard cubic feet. The quantity of nitrogen required is dependent upon drilling conditions and typically adds from \$5 to \$20 per foot, in addition to regular drilling costs.
- During the demonstrations, nitrogen use averaged approximately 150,000 ft³ per well. The volume would be expected to increase with increasing borehole depth.
- The workforce required for cryogenic drilling ranges from two to four people, the same number as for a regular drilling and sampling operation. In many cases, the drillers can operate the nitrogen tanker, so there is no increased cost for personnel. However, if a diesel pumping tanker is required (for delivering nitrogen at pressures greater than 200 psi), then a dedicated nitrogen operator will increase personnel costs, and the cost of the nitrogen supply equipment will also be higher.

Actual and Estimated Costs for Cryogenic Drilling

The cost information presented in Table 6 is based on actual costs incurred during cryogenic drilling of a 52-ft borehole at LBNL during May 1995. The total cost to drill the soil boring was slightly more than \$6,000, roughly half of which was for the nitrogen supply. The nitrogen supply costs include the liquid nitrogen as well as mobilization and set-up, delivery, tanker rental, and the nitrogen system operator. The nitrogen supply costs incurred during this demonstration were higher than were required for the site, and it is anticipated that in future practice, actual costs could be reduced.

Table 6. Actual Cryogenic Drilling Cost for 52-foot Soil Boring

Drilling System	Rate	Cost
NITROGEN (200 - 1000 psi)		
Mobilization/demobilization	\$500/day (2 days)	\$1000
Tanker rental (pumper)	\$250/day (2 days)	\$500
Personnel (pumper operator)	\$50/h (14.5 h)	\$725
Nitrogen	\$0.40/100 ft ³ (140,000 ft ³)	\$560
Trip mileage	\$1.90/mile (120 miles)	\$228
NITROGEN SUBTOTAL		\$3013
B-61 DRILL RIG		
Mobilization/demobilization	\$1,000	\$1000
Rig and crew	\$145/h (14 h)	\$2030
DRILLING SUBTOTAL		\$3030
TOTAL COST		\$6043

Nitrogen pressures and flow rates required for cryogenic drilling are determined in the same manner that air pressures and flow rates are determined for air rotary drilling of a similar size borehole. If a pressure less than 200 psi is required, a pressurized nitrogen tank will be adequate and equipment and personnel costs are less. If pressures higher than 200 psi are required, then a more expensive pumping unit and a dedicated operator are needed.

Although the site did not require the higher pressure and flow rate, during the May 1995 demonstration at LBNL, nitrogen was delivered to the rig with a variable pressure pumping unit, increasing the cost of both equipment and personnel. Crew inexperience also increased the drilling time, which added to the rental cost of the nitrogen supply equipment. It is expected that for a hole requiring less than 200 psi nitrogen, assuming additional crew experience, costs for the nitrogen supply could be reduced significantly. The total costs for cryogenic drilling may then be comparable to competing methods such as mud or air rotary drilling. Depending on site conditions, cryogenic drilling may even be less expensive than other methods when improved drilling rates, costs for disposal of investigation-derived wastes, and monitoring well



development time are also considered. Table 7 shows estimated costs for cryogenic drilling of a 50- to 75-foot investigation well requiring LESS than 200 psi drilling fluid pressure. The cost of the nitrogen supply is just over \$1000, or a little more than one third of the costs incurred during the demonstration.

Table 7. Estimated Costs for Cryogenic Drilling of an Average 50- to 75-foot Investigation Well Requiring < 200 psi Fluid Pressure

Drilling System	Rate	Cost
NITROGEN (0 - 200 psi)		
Mobilization/demobilization	\$295 (1 ea.)	\$295
Tanker rental	\$125/day (1 day)	\$125
Nitrogen	\$0.40/100 ft ³ (140,000 ft ³)	\$560
Trip mileage	\$2.00/mile (est. 100 miles)	\$200
NITROGEN SUBTOTAL		\$1180
AUGER DRILLING RIG		
Mobilization/demobilization	\$1,000 (1 ea.)	\$1000
Rig and crew	\$145/h (8 h)	\$1160
Trip mileage	\$2.00/mile (est. 100 miles)	\$200
Drilling supplies (e.g., bit, grout)	\$200	\$200
DRILLING SUBTOTAL		\$2560
TOTAL COST		\$3740

Increased crew experience is also expected to reduce overall costs when more than 200 psi nitrogen is needed, however, under these conditions, the cost for the nitrogen is still substantial due to higher equipment and personnel costs. An evaluation of site conditions will help determine if these higher nitrogen costs can be offset by faster drilling rates and reduced trouble time, lower drill rig and personnel costs, and lower disposal costs for investigation-derived waste. Even in cases where cryogenic drilling will be more expensive than other methods, however, it may have performance advantages that make it more desirable, such as the capability for more representative sampling.

Table 8 shows estimated costs for cryogenic drilling of a 50- to 75-foot investigation well requiring MORE than 200 psi drilling fluid pressure. These estimates (Tables 7 and 8) assume a typical drilling period of one day. The drilling system requires an auger rotary drilling rig, but does not require any fluid pumps as with conventional water or air drilling systems. The nitrogen delivery system provides the pressure for the drilling fluid. A nitrogen tanker technician (pumper operator) is required for nitrogen delivery when more than 200 psi nitrogen is needed.

Table 8. Estimated Costs for Cryogenic Drilling of an Average 50- to 75-foot Investigation Well Requiring > 200 psi Fluid Pressure

Drilling System	Rate	Cost
NITROGEN (200 - 1000 psi)		
Mobilization/demobilization	\$795 (1 ea.)	\$795
Tanker rental (pumper)	\$65/h (8 h)	\$520
Personnel (pumper operator)	\$50/h (8 h)	\$400
Nitrogen	\$0.40/100 ft ³ (150,000 ft ³)	\$600
Trip mileage	\$2.00/mile (est. 100 miles)	\$200
NITROGEN SUBTOTAL		\$2515
AUGER DRILLING RIG		
Mobilization/demobilization	\$1,000 (1 ea.)	\$1000
Rig and crew	\$145/h (8 h)	\$1160
Trip mileage	\$2.00/mile (est. 100 miles)	\$200
Drilling supplies (e.g., bit, grout)	\$200	\$200
DRILLING SUBTOTAL		\$2560
TOTAL COST		\$5075



SECTION 6

REGULATORY AND POLICY ISSUES

Regulatory Considerations

- The cryogenic drilling technology is similar to standard air rotary drilling. It requires the same permits that are associated with other drilling technologies.
- Investigation-derived wastes, such as drilling fluids, cuttings, and equipment decontamination fluids, must be handled according to Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) requirements. Cryogenic drilling minimizes the amount of investigation-derived waste generated.
- Occupational Safety and Health Administration (OSHA) requirements must be reviewed to ensure worker protection against high noise levels. Like all drilling methods, cryogenic drilling may produce noise levels that are considered dangerous to workers not wearing proper protection. Additionally, OSHA requirements for cold exposure should be reviewed to ensure that workers are knowledgeable of, and protected against, the extremely cold temperature and the potential for oxygen deprivation associated with liquid nitrogen.

Safety, Risks, Benefits, and Community Reaction

Worker Safety

- Health and safety issues associated with the drill rig operation when performing cryogenic drilling are essentially equivalent to those for conventional drilling technologies. Worker exposure to hazardous and radioactive materials can be expected to be less with cryogenic drilling because no drilling liquids (such as mud) are used and the amount of investigation-derived waste is minimized.
- Frostbite and asphyxiation hazards could be associated with exposure to liquid nitrogen. Large clouds of condensed water vapor caused by the release of cold nitrogen into the atmosphere could be a nuisance and a safety hazard. Training is required to ensure worker protection from these hazards.

Community Safety

- Cryogenic drilling does not produce routine release of contaminants.
- No unusual or significant safety concerns are associated with the transport of equipment, samples, waste, or other materials associated with cryogenic drilling.

Environmental Impacts

- Cryogenic drilling systems require essentially the same amount of space as conventional techniques but will require additional space for the liquid nitrogen tank(s).
- The chemistry and biology of the region within a meter of the borehole may experience a small impact because of the injection of nitrogen and the cold temperature.
- Liquids near the borehole will be frozen, thereby reducing the risk of cross-contamination during drilling.
- Operation of the drill rig will create moderate noise and small amounts of diesel exhaust in the immediate vicinity.



Socioeconomic Impacts and Community Perception

- Cryogenic drilling has a minimal, short-term economic or labor force impact.
- The general public has limited familiarity with cryogenic drilling technology. However, there is greater potential for community acceptance of cryogenic drilling than of competing technologies that require the use of drilling muds.



SECTION 7

LESSONS LEARNED

Implementation Considerations

- The potential exposure of the equipment to liquid nitrogen's extremely cold temperature will impact design decisions as this technology is brought closer to commercialization. The following considerations are applicable:
 - Conventional drilling equipment is made of plain carbon steel, which becomes brittle at low temperatures.
 - The ductility and sealing properties of seals and packings decreases at low temperatures.
 - The lubricants could freeze.
 - Thermal expansion and decreases in ductility of some metals can lead to a decrease in the robustness of joints and welds.
- The following steps could be taken to compensate for such design issues:
 - Using face-centered cubic metal alloys, including most types of brass, bronze, stainless steels, and aluminum for the components of the swivel and drill pipe. These alloys are not adversely affected at liquid nitrogen temperatures;
 - Substituting graphite-filled polytetrafluoroethylene in the form of a chevron or rope packing for seals; and
 - Selecting dry lubricants commonly used in the aerospace industry, which are suited for exposure to extreme cold.

Technology Limitations/Needs for Future Development

- Future work could involve refining the modeling process, drilling slant wells and vadose zone drilling in highly unstable sand and boulder geologies, testing materials for exposure to liquid nitrogen during the drilling process, and determining the effects of the low-temperature drilling on bit wear and rate of penetration.
- Testing the technique in more challenging formations will establish the advantages and capabilities of cryogenic drilling. Work to perfect the cryogenic drilling field equipment, technique, and development of cryogenic sampling and liquid cryogenic drilling is ongoing.
- Further developments in cryogenic drilling may allow for horizontal (utility line or other) drilling without the use of drilling muds.

Future Technology Selection Considerations

Private industry is considering further testing and implementation of cryogenic drilling. Future activities could include the following:

- Using larger, more powerful, more versatile drill rigs;
- Using cutting containment systems compatible with cryogenic drilling;
- Developing a cryogenic coring technique for use with the cryogenic drilling technique to obtain excellent-quality core samples; and
- Investigating the potential for well completion in an open (uncased) borehole in unstable ground.

APPENDIX A



REFERENCES

- Cooper, George A. 1996. *Cryogenic Drilling—A Novel Method for Drilling Environmental Monitoring and Remediation Wells in Unconsolidated Soils and Rock*, an Environmental Technology Fact Sheet, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA (Sections 1, 2, 5, and 7).
- Cooper, George A. 1996. *Investigation of Low-Temperature Air as a Drilling Fluid in Order to Strengthen Borehole Walls While Drilling*. University of California, Berkeley (Section 1).
- Cooper, George A., Pippin Cavagnaro, and Rafael Simon. 1996. *Cryogenic Drilling at Aerojet, Full Report: A Successful Hole Drilled in Alluvial Unconsolidated Soil*. University of California, Berkeley (Sections 1, 2, 3, and 7).
- Cooper, George A., Pippin Cavagnaro, and Rafael Simon. 1995. *Cryogenic Drilling Literature*. University of California, Berkeley (Section 1).
- Cooper, George A. and Rafael Simon. 1994. *Use of Cryogenic Fluids for Environmental Drilling in Unconsolidated Formations*. University of California, Berkeley, presented to the ASME Energy Sources Technology Conference, New Orleans, LA (Section 1).
- Cooper, George A. and Rafael Simon. 1995. *Cryogenic Drilling: A New Drilling Method for Environmental Remediation*. University of California, Berkeley (Sections 1, 2, 3, 5, 6, and 7).
- Cooper, George A. and Rafael Simon. 1995. "Drilling Chills Out," *Berkeley Research Highlights*, University of California, Berkeley (Section 1).
- Cooper, George A. and Rafael Simon. 1995. *Field Test of the Cryogenic Drilling Method for Environmental Well Installation*. University of California, Berkeley, presented to the ASME Energy Sources Technology Conference and Exhibition, Houston, TX (Sections 1, 2, 3, 4, and 7).
- Simon, R. D. 1996. *Cryogenic Drilling—A Novel Method for Drilling Environmental Boreholes*. University of California, Berkeley (Section 1).
- Woolridge, Mike. 1994. "Scientists Put the Chill in Drill to Clean Up Wastes," *LBL Currents*, May 20, Vol. 22, No. 20, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA (Section 1).
- Woolridge, Mike. 1994. "Cold Gas Aids Toxic Cleanup," *Design News*, June 27 (Section 1).

Bijlage 4 Verslag overleg met Hoekloos en boorbedrijven

Kiwa N.V.
Water Research
Groningenhaven 7
Postbus 1072
3430 BB Nieuwegein

Telefoon 030 60 69 511
Fax 030 60 61 165
Internet www.kiwa.nl

Bijeenkomst cryogeen boren bij Kiwa (Nieuwegein)

Vergadering / nr.: 2
Secretaris: C. Vink
Datum: 7 april 2004
Stuknummer: CB2_1

Aanwezig:

Peter Beuker (Hoekloos)
Joost van de Ven (Hoekloos)
Frits van Manen (Hoekloos)
Frans Glorie (Bam Nbm Infra)
Anne Nieuwaal (Haitjema)
Gijsbert Cirkel (Kiwa)
Kees Vink (Kiwa)

CC:

Ton Timmermans (Dura Vermeer)
Jan Willem Kooiman (Kiwa)

	Afspraken
1	Hoekloos levert een prijsindicatie van stikstofgas.
2	Kiwa maakt een indicatieve kostenraming voor een boring met een diameter van 600 mm met een annulaire ruimte van 5 cm en een diepte van 50 m. (19 mei)
3	De resultaten van de indicatieve berekeningen worden medio mei naar de deelnemers verstuurd

Kees Vink (Kiwa) opent de vergadering en heet de aanwezigen welkom. Ton Timmermans (Dura Vermeer) heeft telefonisch laten weten niet aanwezig te kunnen zijn doordat hij ten zuiden van Den Bosch in een zeer grote file is beland. Hij heeft zijn commentaar op het conceptrapport per telefoon aan Kees Vink doorgegeven.

Gijsbert Cirkel presenteert de stand van zaken met betrekking tot het cryogeen boren. De experimenten die in de Verenigde Staten zijn uitgevoerd betreffen kleine boorgatdiameters in vergelijking met de in Nederland voor pompputten toegepaste boorgatdiameters. De maximale diepte van de in Amerika uitgevoerde experimentele boringen bedraagt slechts 25 meter beneden maaiveld. Deze diepte is gering in vergelijking met de gangbare diepten van Nederlandse pompputten. Als gevolg van deze verschillen bestaat er nog onvoldoende inzicht in de mogelijkheden en beperkingen van toepassing van de cryogene boortechniek voor Nederlandse pompputten.

Technische aspecten

De aanwezigen geven vervolgens hun mening over de technische aspecten van cryogeen boren. De resultaten van de discussie zijn op hoofdlijnen navolgend weergegeven:

1. Toepassing van PVC voor buizen en filters is waarschijnlijk niet mogelijk doordat dit materiaal bros wordt bij lage temperaturen. In plaats van PVC zal RVS moeten worden gebruikt.
2. Met stikstofgas bevroren grond met een temperatuur van tientallen graden onder nul is mogelijk te hard om met een stalen boor te bewerken. Medewerkers van Hoekloos hebben in Singapore waargenomen dat langdurig met stikstofgas gekoelde grond zodanig hard is dat de vonken van de beitels afvliegen en fresen met een stalen freesbeitel feitelijk niet mogelijk bleek.
3. Met de in Nederland gangbare boormachines kan mogelijk onvoldoende beiteldruk worden geleverd om een snelle boring van bevroren grond uit te voeren.
4. Boorgaten voor de drinkwaterproductie hebben gewoonlijk een diameter van 500 - 600 mm. Bij deze diameters is het oppervlak van een dwarsdoorsnede van de annulaire ruimte zowel proportioneel als absoluut aanzienlijk groter dan bij de diameters die bij de experimenten in Amerika van toepassing waren. Het gevolg van deze verschillen is dat de behoefte aan stikstofgas veel hoger is doordat de stroomsnelheid van het stikstofgas de transportcapaciteit bepaalt.
5. Toepassen van extra grote boorbuisdiameters kan de grootte van de annulaire ruimte en daarmee de benodigde hoeveelheid stikstofgas beperken.
6. Indicatieve sterkteberekeningen zijn nodig om te kunnen schatten hoe dik het bevroren grondlichaam moet zijn om instorten te voorkomen. De opwaartse waterdruk vormt hierbij een belangrijkere factor dan de opwaartse gronddruk.

Uit de discussie komt naar voren dat de cryogene boortechniek voor een aantal toepassingen als veelbelovend worden beschouwd:

- voor milieutechnische toepassingen waar verspreiding van een verontreiniging dreigt bij klassieke boortechnieken;
- voor speciale toepassingen, zoals het uitvoeren van geotechnische metingen;
- bij boren onder artesische condities;
- bij horizontaal gestuurd boren.

Voordelen van cryogeen boren die nog niet in het conceptrapport zijn genoemd zijn:

- geen werkwater nodig;
- steekvaste boorspecie.

Kosten

De mate waarin cryogeen boren voor de aanleg van drinkwaterpompputten een kansrijke optie kan worden hangt sterk af van de kosten in vergelijking met de klassieke techniek. De cryogene boortechniek zal niet worden toegepast wanneer de meerkosten van cryogeen boren hoger zijn dan de te verwachten besparing op regeneratiekosten en afschrijving van een pompput.

De maximaal haalbare boorsnelheid wordt door de vertegenwoordigers van de boorfirma's als een belangrijk criterium voor de kosteneffectiviteit van cryogeen boren gezien. Tijdens de vergadering uitgevoerde indicatieve berekeningen van de benodigde hoeveelheden stikstofgas en de meerkosten van cryogeen boren wijzen uit dat de techniek waarschijnlijk niet rendabel is voor aanleg van drinkwaterpompputten, tenzij bezuinigd kan worden op de benodigde hoeveelheden stikstofgas en/of de boorsnelheid verhoogd kan worden.

Voor afweging van de kosten van cryogeen boren

- moet duidelijk zijn hoe duur stikstofgas is, afhankelijk van benodigde hoeveelheid, debiet en druk;
- moet duidelijk zijn hoeveel stikstofgas benodigd is, als functie van boorgatdiameter en diepte;
- is de maximaal haalbare boorsnelheid een belangrijk criterium.

De haalbare boorsnelheid wordt bepaald door de vriessnelheid en de benodigde dikte van de bevroren grond om te voorkomen dat het boorgat instort.

Ten slotte is tijdens de vergadering gesproken over technische alternatieven voor de in Amerika toegepaste techniek, waarmee zou kunnen worden bezuinigd op de benodigde hoeveelheid stikstof, en daarmee op kosten. Twee alternatieve boortechnieken kwamen uit de gesprekken naar voren:

- eerst vriesboren met een kleine diameter, vervolgens door toevoeren van stikstof een bevroren grondlichaam maken en vervolgens het boorgat ruimen naar een grotere diameter;
- gebruik van lucht als transportmedium zodat het stikstofgas alleen wordt gebruikt voor het bevriezen van de grond, niet voor het transport van losgeboord materiaal.

De vergadering wordt om 12:00 gesloten.