

JET - GROUTING
Statusrapport etter fire
forsøksprosjekt

Vegdirektoratet
Veglaboratoriet



Laboratoriet er etablert i Postboks 1200, Vikersdal, Oslo 2, Tlf. 1001 og 23 90

Veglaboratoriets interne rapporter omfatter undersøinger, tekniske undersøkelser, studier, forslag til forbedringer, foredrag og kurskompendier.

Rapportene er delt i to grupper:

- B. For bruk innen Statens vegvesen
- C. For utdanning

Innholdet eller deler av det må ikke offentliggjøres uten tillatelse fra Veglaboratoriet.

Veglaboratoriet

Prosjekt nr. 10/197-27

Oppgave nr. 37 - GROUTING

Oppdragsbetaler: Vegvesenets Forsknings- og Utviklingskontor

Dato: April 1989

JET - GROUTING

Statusrapport etter fire

forsøksprosjekt

Vegdirektoratet
Veglaboratoriet

Gaustadalleen 25, Postboks 6390 Etterstad, Oslo 6 Tlf. (02) 63 99 00



Veglaboratoriets Interne rapporter omfatter utredninger, forskningsresultater, studiebesøk, forslag til retningslinjer, foredrag og kurskompendier.

Rapportene er delt i to grupper:

- B: For bruk innen Statens vegvesen
- C: For fri distribusjon

Innholdet eller deler av det må ikke publiseres videre uten tillatelse fra Veglaboratoriet.

prosjekt/oppdrag: ID/159-2F

seksjon: 47 - Geoteknisk

saksbehandler: F.Oset/L.Ø.Hoksrud/T.E.Frydenlund/H.Hovi / TG

dato: April 1989

rapportsammendrag

<input checked="" type="checkbox"/>	Intern rapport
<input type="checkbox"/>	Laboratorierapport
<input type="checkbox"/>	Oppdragsrapport

111	A	Rapportstatus*) N	Seksjon/fylke 47	Prosjekt	Gruppe: C	nr. 1405																	
1	2	3	4	5	21	31	41	51	61	71	81	91	101	111	121	131	141	151	161	171	181	191	201

TITTEL	212	A	Jet - grouting. Statusrapport etter fire forsøksprosjekt.																			
--------	-----	---	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

SAKS-BEHANDLER	221	A	Navn	Lars Ø. Hoksrud	Institusjon	L.Ø. Hoksrud
		B	Harald Hovi	L.Ø. Hoksrud		
		C	Frode Oset Tor Erik Frydenlund	Veglaboratoriet Veglaboratoriet		

RAPPORT DATA	421	A	Rapporttype**)	FOU	Dato	April 1989	Erstatter rapport nr:
		B	Totalt sidetall	31	Språk	Norsk	
		C	Antall fotos	Ant. figurer	Ant. tabeller	Ant. litt.henv.	
		D	Sammendrag i andre språk			UTM ref.	

SAMMENDRAG	511	A	<p>Veglaboratoriet har i samarbeid med firma L.Ø. Hoksrud gjennomført et utviklingsprosjekt for jet-grout peler med tanke på bruk i vegbygging. Prosjektet har hatt finansiell støtte fra Næringsdepartementet. Metoden har vært prøvet i tilknytning til fire vegprosjekter med ulike grunnforhold.</p> <p>Best resultat med hensyn til kontinuitet og kvalitet av det produserte pelematerialet er oppnådd i ensgradert sand.</p> <p>I grove masser som steinholdig og blokkholdig grus og sand har en ikke klart å fremstille kontinuerlige konstruksjonselementer av tilfredsstillende kvalitet.</p> <p>Brukt som grunnforsterkning har metoden gitt et akseptabelt resultat i siltig sand og silt.</p> <p>I samtlige forsøk viste produsert pelemateriale lav frostbestandighet og frostisolering vil derfor være nødvendig der konstruksjonsdeler av jet-grout vil bli eksponert for frost.</p> <p>Med nåværende produksjonsteknikk synes metoden å ha størst potensiale som konstruksjonselement i sandavsetninger og ellers ved grunnforsterkning og underpinning i silt og sandavsetninger. I grovere stein- og blokkholdige masser er metoden lite egnet.</p> <p>Når det gjelder produksjonsutstyr og prosedyrer er det behov for å utvikle bedre produksjonsstyring og kontroll. Det ligger også et utviklingsbehov innen feltet betongteknologi. Avgjørende for bruk av metoden er tilfredsstillende kvalitet og konkurransedyktig pris.</p>																			
------------	-----	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

FAG-OMR.	611	A	Grunnforsterkning	42.2
		B		
		C		

NØKKELOORD	621	A	Injeksjon	4320
		B	Sementvelling	4729
		C	Landkar	3424
		D	Støttemur	3359
		E	Understøtte	3376
		F		
		G		
		H		

11-86

INNHALDSFORTEGNELSE

	side
1. Utviklingsprosjektet - hensikt og innsatsfordeling	1
2. Utførte forsøksprosjekt og erfaringer	1
2.1 Jernbanekryssing ved Liodden	2
2.2 Kulvert under Storgata i Elverum	5
2.3 Landkarfundamenter for Børja bru	10
2.4 Jernbaneundergang ved Moen	13
3. Tolking av resultatene fra prosjektet	18

Vedlegg 1. Generell beskrivelse av metode, utstyr, produksjonsparametre m.m.

1. UTVIKLINGSPROSJEKTET - HENSIKT OG INNSATSFORDELING

Våren 1987 ble det inngått en kontrakt mellom Veglaboratoriet og firma L.Ø. Hoksrud for gjennomføring av et forsknings- og utviklingsprosjekt for jet-grouting.

Kostnadsrammen for prosjektet var på 5,9 mill. kroner. Næringsdepartementet bevilget etter søknad fra L.Ø. Hoksrud et tilskudd til prosjektet på 2 mill. kroner. Finansieringen av prosjektet ble avtalt som vist:

2.300.000,- kr. fra L.Ø. Hoksrud
2.000.000,- kr. fra Næringsdepartementet
1.600.000,- kr. fra Statens vegvesen / Veglaboratoriet.

Hensikten med prosjektet var å vinne erfaring med metoden mht. produksjonsparametre, produksjonskontroll og kvalitet av ferdig produkt, sett i forhold til ulike jordarter og konstruksjonstyper.

For Statens vegvesen var det en forutsetning at forsøksprogrammet ble gjennomført i tilknytning til aktuelle byggeprosjekter. Det ble valgt prosjekter hvor jet-grouting prismessig skulle kunne konkurrere med andre byggemetoder.

Gjennomføringen av forsøksprogrammet har bestått av

- alternativ prosjektering av byggverk med anvendelse av jet-grouting.
- injisering av prøvepeler i stedlige masser.
- frigraving av og kjerneboring i prøvepelene.
- materialprøving av kjernene i laboratorium.

I ett tilfelle er det også utarbeidet anbud for alternativ utførelse med jet-grouting.

2. UTFØRTE FORSØKSPROSJEKT OG ERFARINGER

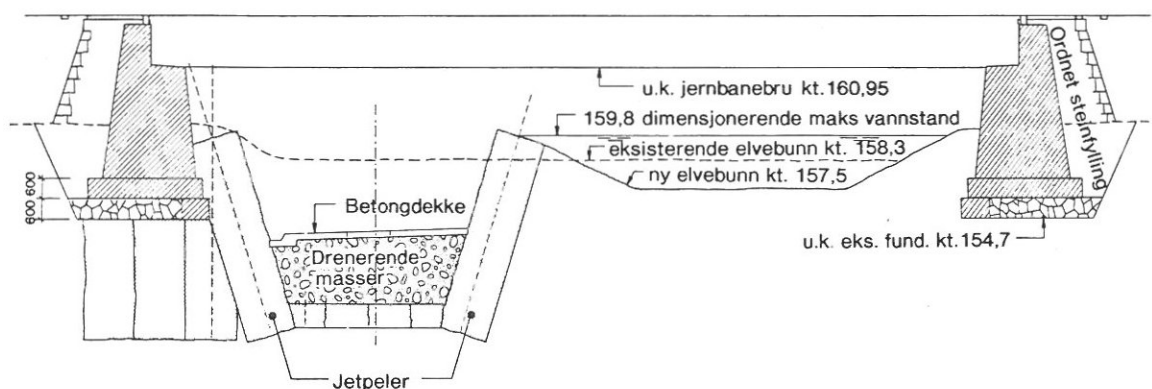
I det etterfølgende er det gitt beskrivelser av fire utførte forsøksprosjekt. Beskrivelsene konsentrerer seg om de viktigste sidene av hvert prosjekt. For mer detaljerte beskrivelser vil vi henvise til forprosjekt-dokumentasjon utarbeidet av L.Ø. Hoksrud og til Veglaboratoriets oppdragsrapporter.

En generell beskrivelse av metode, utstyr m.m. er gitt i vedlegg 1.

2.1 JERNBANEKRYSSING VED LIODDEN

Prosjektet gjaldt en undergang for fylkesveg F-212 under Bergensbanen ved Liodden i Hallingdal. Buskerud vegkontor ønsket å legge om vegen ca 40 m mot nord og utnytte elveløpet under eksisterende jernbanebru både som elveløp og vegtrasé.

Det ble utarbeidet forprosjekt i to alternativ. Anvendelsen av jet-grouting var ment å omfatte underpinning av søndre landkar for jernbanebrua og eventuelt også vanntette støttemurer og bunnplate i den del av vegtraséen som ble liggende under flomvannstanden.



Figur 1. Liodden. Løsningforslag med underpinning og støttemurer av jetinjiserte peler.

Grunnforhold.

Grunnen på stedet består av grusig sand og sand med varierende innhold av stein og blokk. Størst er stein- og blokkinnholdet ute i elveløpet hvor det er dannet en 2-3 m tykk erosjonshud.

Massene anses ikke spuntbare.

Prøvepeler.

For å klarlegge metodens anvendelighet i de stedlige masser ble det injisert 4 prøvepeler.

To av pelene ble satt inntil hverandre med senteravstand 1,8 m for å vurdere tetthet og kontinuitet av den sammenvevde sonen mellom pelene. Lengden av de to pelene var henholdsvis 3,9 og 3,7 m.

De to øvrige pelene ble injisert enkeltvis, med lengder på 1,0 og 1,5 m.

Produksjonsparametrene var som vist i tabell nedenfor.

P E L nr.	T R Y K K			LØFTE- HASTIGHET	ROTASJON	PRODUSERT LENGDE	DYSEDIA- METER (vann) mm
	LUFT	VANN	GROUT				
	Bar			cm/min	omdr/min	m	
1	7	475	30	5	5	3.9	2.0
2	7	350	30	5	5	0 - 1,3	1.8
	7	450	30	4	5	1,3 - 3,7	1.8
3	7	450	30	6	6	1.0	1.8
4	8	450	30	6	6	1.5	2.0

Det ble registrert en del utforutsette stopp og andre uregelmessigheter under injiseringen. Med foreliggende produksjonsutstyr og produksjonsprosedyrer klarte en ikke å hindre og/eller kompensere for uheldige effekter av dette.

Etterundersøkelser.

Det ble boret ut 84 mm kjerneporøver ved aksiell gjenomboring av alle pelene, skrå gjenomboring av pel 2 og radiell gjenomboring av pel 3 og 4.

Pel 3 og 4 ble i tillegg helt frigravd.

Diameteren på pelene var ca 1,4 m for pel 3 og 0,9 m for pel 4. Ut fra skråborinngen ble diameteren på øvre del av pel 2 anslått til ca 1 m.

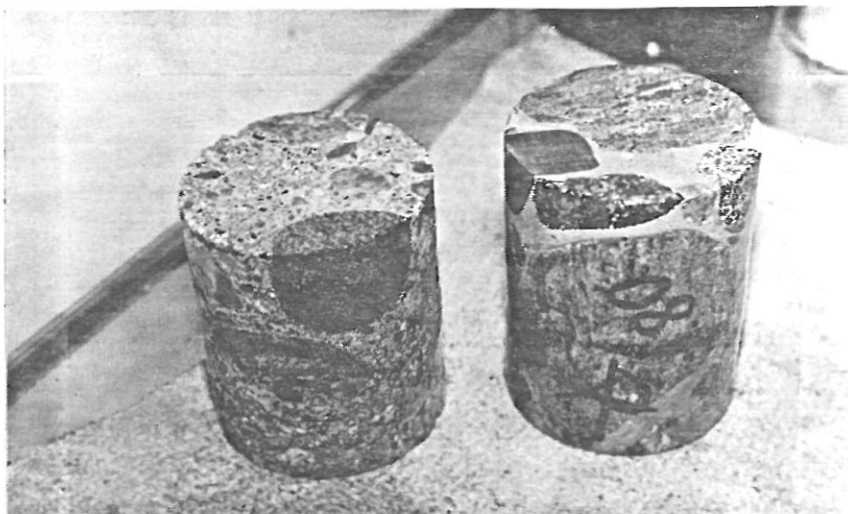
70 % av kjernematerialet var fast materiale, dvs. hel kerne eller bruddstykker bundet sammen av sement. 30 % var løst materiale uten bindstoff.

Det faste pelematerialet varierte fra betong med tilsynelatende velgradert tilslag, via soner med sementpasta iblandet adskilte gruskorn til magrere materiale med lavt sementinnhold. Denne variasjonen i det produserte materialet gjenspeiler seg også i resultatene fra laboratorieundersøkelsene.

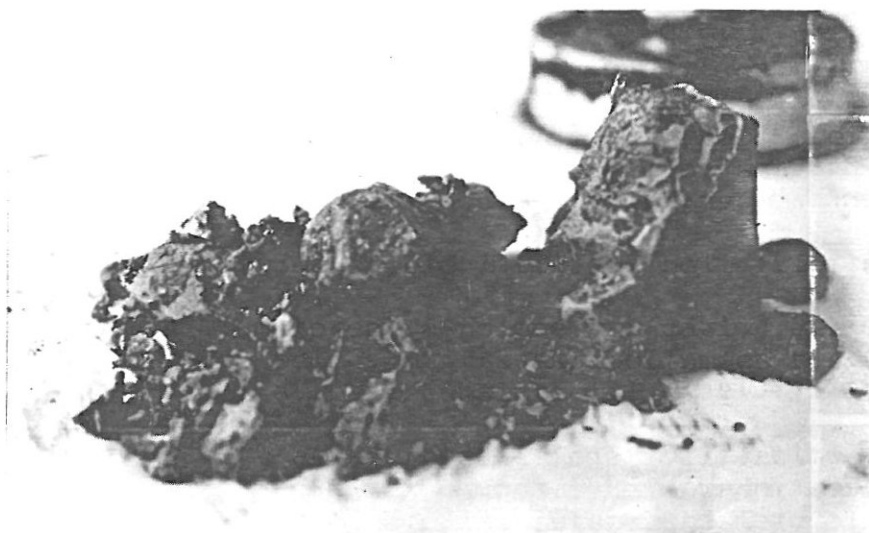
Trykkfasthet målt i betongpresse varierte fra 2,8 - 27 MPa, med middelerdi 12 MPa.

Permeabilitetsmålinger på hele kjerner viste at disse var relativt tette ($k = 0,2-3,5 \times 10^{-6}$ cm/s), tilsvarende permeabiliteten i fin silt.

Frostbestandigheten ble testet ved 4 timer frysing i luft i -20°C og 2 timer tining i vannbad. Mer enn halvparten av prøvene sprakk opp og brøt sammen allerede etter 12 frostvekslinger, mens de siste brøt sammen etter 57 vekslinger.



Figur 2a. Kjerneprøver med grovt tilslag



Figur 2b. Kjerneprøve etter fryseforsøk, 12 vekslinger.

Vurdering.

Kjerneboringene og frigraving av to av pelene ga inntrykk av en lite homogen struktur i pelematerialet.

Pelens diameter (0,9-1,4 m) var klart mindre enn den forutsatte på 2 m. Øket erosjonstrykk burde kunne gi noe større diameter enn det som ble oppnådd.

Prøvepelene viste ellers at man måtte forvente vanninnstrømning gjennom de mer åpne soner i pelene, og at metoden derfor ikke var egnet til å etablere vanntette støttemurer i grove friksjonsmasser.

Frostbestandigheten for materialet var så lav at frost-isolasjon ville være nødvendig.

For dette prosjektet ble metodens mulige anvendelse funnet å være underpinning av landkaret for jernbanebrua.

Vegkontoret i Buskerud har senere lagt om veglinjen mot sør og bygget bru over jernbanen.

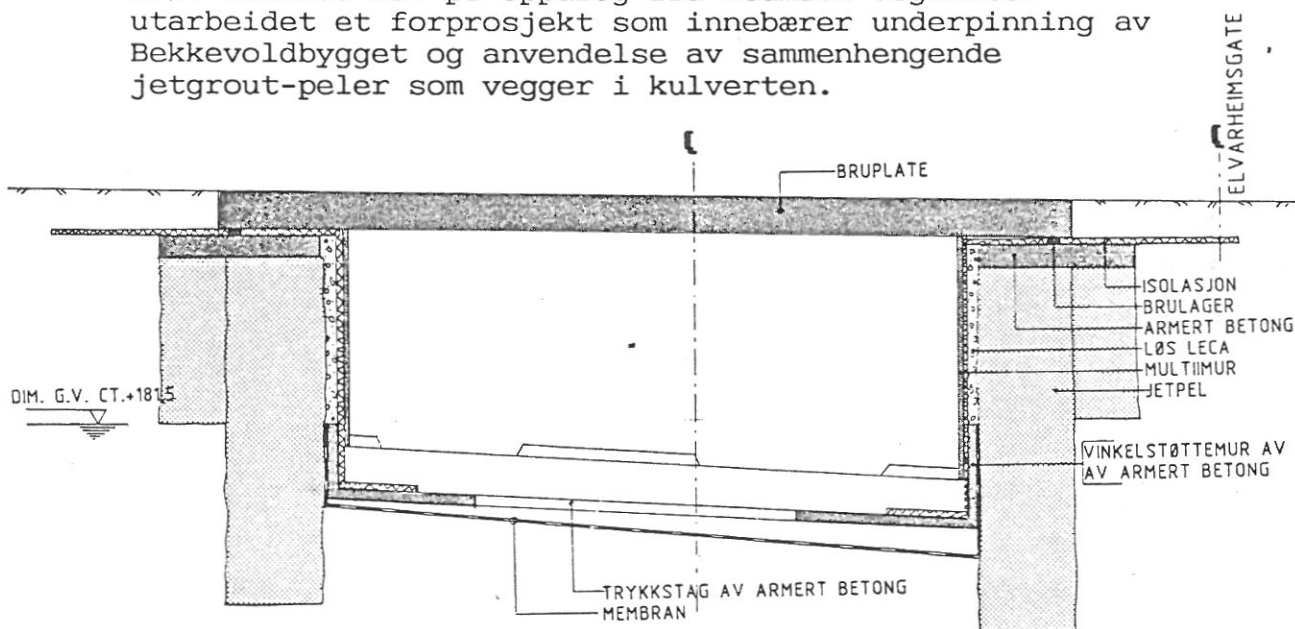
For nærmere detaljer vises det til Veglaboratoriets rapport F-266A.

2.2 KULVERT UNDER STORGATA I ELVERUM.

Omlagging av rv 25 gjennom Elverum medfører at riksvegen legges i kulvert under Storgata.

I anleggsfasen vil det være nødvendig med sikring av en tilstøtende bygning, Bekkevoldbygget. Det blir også lagt vekt på at byggingen skal innebære minst mulig ulempe for trafikken i Storgata og virksomheten ellers i området.

L.Ø. Hoksrud har på oppdrag fra Hedmark vegkontor utarbeidet et forprosjekt som innebærer underpinning av Bekkevoldbygget og anvendelse av sammenhengende jetgrout-peler som vegger i kulverten.



Figur 3. Elverum. Løsningsprinsipp med jetinjiserte vegger.

Grunnforhold.

I kulvertområdet består grunnen av 4-6 m ensgradert fin og middels sand over et lag av sandig grus med moderat innhold av stein og blokk.

Kulverten vil bli liggende delvis under grunnvannstanden i området og må derfor bygges vanntett i de deler som ligger under dimensjonerende grunnvannsnivå.

Prøvepeler.

For å klarlegge muligheter og begrensninger for anvendelse av jetgrout-metoden på stedet ble det injisert 6 prøvepeler i november 1986.

Under produksjonen ble en del av produksjonsparametrene variert, så som erosjonsdyse, erosjonstrykk, rotasjons-hastighet og i noen grad løftehastighet. Pel 6 ble tilsatt luftinnførende stoff. Variasjon i produsert diameter var en del av prøveprogrammet for senere å kunne kalibrere produksjonsparametre.

Produksjonsparametrene var som vist nedenfor.

P E L nr.	T R Y K K			LØFTE- HASTIGHET	ROTASJON	PRODUSERT LENGDE	DYSEDIA- METER (vann) mm
	LUFT	VANN	GROUT				
	Bar			cm/min	omdr/min	m	
1	8	450	30	5	10	2,8	1.8
2	8	300	30	5	5	1,7	1.8
3	8	400	30	4	5	3,0	2.2
4	8	350	30	5,5	5	3,0	2.2
5	7	400	30	5	5	3,0	1.8
6	7	400	30	5	5	2,6	1.8

Det ble kun produsert peler i sandlaget ned til ca 4 m dybde.

En av pelene ble satt enkeltstående, de fem andre i en vinkel med 1,8 m senteravstand mellom hver pel.

Ved produksjon av pel 4 ble det stans på grunn av strømbrydd, ellers forløp produksjonen uten særskilte problemer.

Etterundersøkelser.

Pelene ble frigravd og spylt for å avdekke utstrekning og overflate av herdet materiale. Det viste seg at pelene hadde en klart definert ytterkant.



Figur 4. Frigraavde peler.

Pelenes diameter er vist i tabellen nedenfor.

Pel	Diameter (ca)
1	1.8 m
2	1.1 m
3	2.4 m
4	2.4 m
5	2.4 m
6	2.2 m

I pel 4 var det en kraftig innsnevring av diameteren i det nivået hvor strømstansen oppstod. Sonen var ca. 40 cm høy.

Bakgrunnen for dette er at man ved gjenopptagelse av produksjonen fortsatte fra det samme nivået hvor man fikk stoppen. Da trykket falt i den eroderte, men ikke injiserte sonen, resulterte dette i at de overliggende massene raste ned og fylte denne sonen. Ved gjenopptagelse av jetinjiseringsen ble denne sonen kun injisert, ikke erodert. Dette medførte at pelen fikk en mye mindre diameter i dette området.

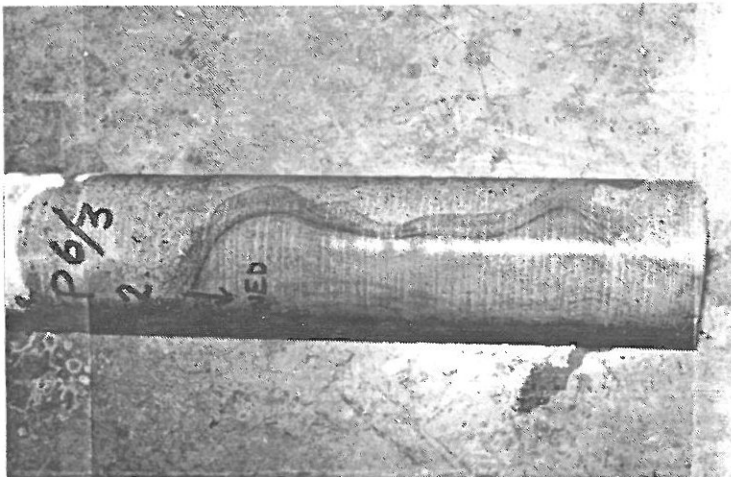
Pelene hadde ellers tydelige bremmer som viste hvor løsmassene var løst lagret og dermed lett eroderbare. Bremmene kan pigges vekk for å oppnå en jevn overflate. Sammenvevingen mellom pelene var fullstendig, uten synlige hulrom.

Kjerneprøver

Det ble boret ut 11 m vertikale og 18 m horisontale kjerneprøver.

Kjernene ga inntrykk av en fast og forholdsvis homogen struktur i pelene, med enkelte små, lokale sandlommer.

Boringer gjennom de sammenvevde sonene mollem pelene viste at disse ikke representerte noen svakhetszone i konstruksjonen.



Figur 5. Kjerneprøve fra sammenvevd sone.

Målt trykkfasthet på kjerneprøvene varierte fra 7,4 - 54 MPa, med middelerdi 23 MPa. Loggen fra prøveproduksjonen gir ikke grunnlag for å anta annet enn at man må forvente en tilsvarende variasjon ved ordinær produksjon.

Frostbestandigheten var også svært variabel. Enkelte prøver smuldret ned allerede etter 20-25 frostvekslinger, mens omlag halvparten tålte 45 frostvekslinger.



Figur 6. Gjennomgående oppsprekking i prøve etter 25 frostvekslinger.

En tendens trer tydelig fram: Prøvene fra de horisontale boringene viser høyest trykkfasthet og frostbestandighet i ytterkant av pelene. Av 9 prøver fra de ytterste 40 cm i pel 1, 3, 5 og 6 var det bare en som var brutt sammen etter 45 frostvekslinger. Midlere trykkfasthet i samme område var 36 MPa.

Disse høye verdiene i randsonen har trolig sammenheng med at pelene er satt over grunnvannstanden. Jorda rundt pelene har forårsaket et visst vannutttrekk av den injiserte massen før herding og dermed et lavere og gunstigere v/c-forhold.

Målt permeabilitet lå i området $2,1 \times 10^{-5}$ cm/s til $0,7 \times 10^{-8}$ cm/s, noe som innebærer tilstrekkelig tetthet mot grunnvannsinntrengning for et kontinuerlig pelemateriale.

Vurdering.

Prøveproduksjonen viste at det er mulig å produsere jetgrout-peler i det øvre sandlaget med tilstrekkelig diameter, fasthet og tetthet til at disse kan anvedes som bærende elementer i kulvertveggene. Forsøkene viser ellers at det vil være nødvendig med frostisolasjon.

Pelematerialets tetthet mot grunnvannsinntrengning i det underliggende gruslaget er ikke avklart ved dette forsøket. Erfaringene fra Liodden tilsier at man heller bør basere seg på tetting med membran inntil vellykkede forsøk er utført også i grove masser.

Innsnevringen i diameter som oppstod ved produksjonsstans i en del av pel 4 understreker behovet for produksjonskontroll og nødvendigheten av å forberede tiltak som kan settes i verk under produksjonsprosessen for å kompensere for eventuelle uregelmessigheter som oppstår.

For å unngå problemer må man etter driftsstans gå ned ca 40 cm i forhold til det nivået man er på ved stansen, før produksjonen gjenopptas. På denne måten får en også erodert sonen med nedrast materiale.

På grunn av omprioriteringer i fylket er anleggsstarten utsatt til 1992. Videre prosjektering av undergangen og endelig valg av byggethode er derfor stilt i bero.

En mer detaljert beskrivelse av forsøkene er gitt i Veglaboratoriets rapport D-150A.

2.3 LANDKARFUNDAMENTER FOR BØRJÅ BRU.

Ny riksveg 2 forbi Skotterud krysser Børjåa på to steder. Ved nordre kryssing er det bygget en ettspenns NIB-bru med lengde 25 m.

For å begrense setninger i de øvre jordlag er det utført grunnforsterkning under landkarene med jetinjisering.

Grunnforhold.

Utførte undersøkelser viste lagdelt sand og silt. På sørsiden av elva var det registrert et 0.5 m tykt leirlag i ca 6 m dybde. På begge sidene av elva er det fastere lagret sand fra 6 m dybde, og varierende lagringsfasthet fra 10 m dybde. Fjell var ikke påtruffet ved fjellkontrollboring til 50 m dybde.

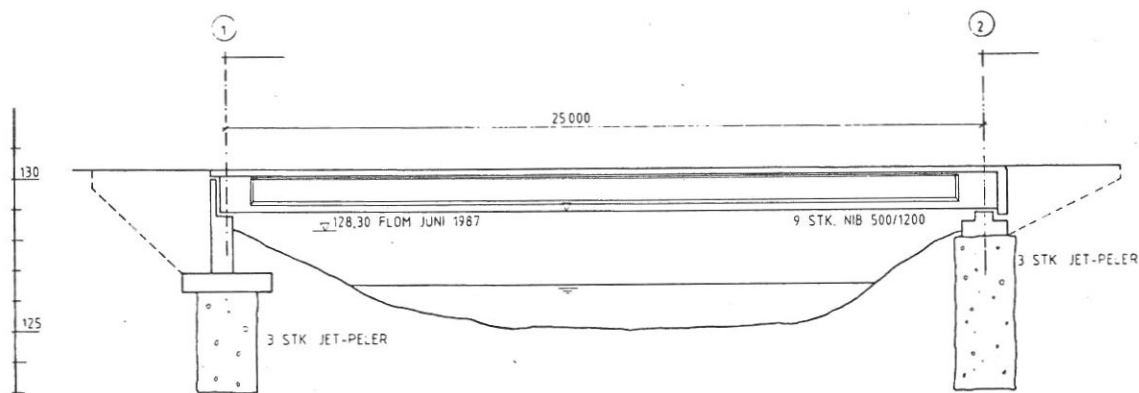
De øverste 6 m er svært løst lagret og ble antatt å være setningsgivende.

Grunnundersøkelser etter produksjon

Under produksjonen ble det avdekket en del kvist i returmassen, spesielt i profil 19670 på søndre side.

For å klarlegge innholdet av humus og trerester i de finstoffrike lagene ble det i etterhånd tatt opp 54 mm sylindrerprøver bak begge landkarene. Enkelte steder hadde man da problemer med å få ned prøvetakeren på grunn av antatte trerester.

Prøvene viste at grunnen 3-4 meter bak landkaraksene består av ensgradert sand, og utbredelsen av finkornige masser ser derfor ut til å være begrenset. Trerester ble funnet i prøvene, men ikke finfordelt humus i noe omfang.



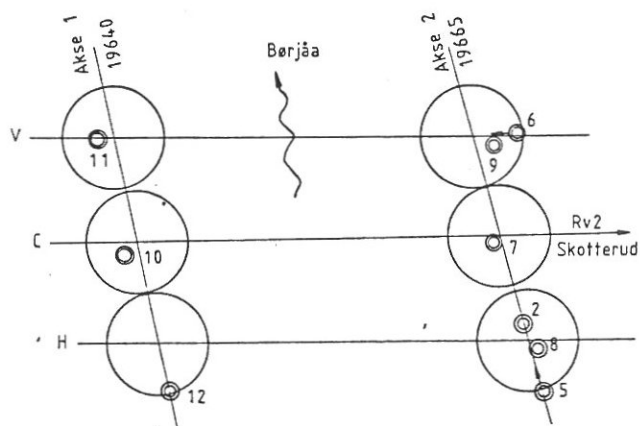
Figur 7. Børja bru. Grunnforsterkning med jetpeler.

Injisering av peler.

Pelene ble injisert i september 1987. Det ble injisert tre peler i rekke ved hvert landkar.

For kontroll med utbredelsen av pelene ble det satt ned perforerte plastrør vertikalt i avstand 1-1,2 m fra senter.

Disse virket stort sett som forutsatt ved at man kunne påvise injisert masse i rørene innenfor den første meteren av peleproduksjonen.



Figur 8. Grunnriss av peleplassering og plassering av kjerneboringer.

Produksjonsparametrene var som vist nedenfor:

P E L	T R Y K K			LØFTE- HASTIGHET	ROTASJON	PRODUSERT LENGDE	MERKNAD
	LUFT	VANN	GROUT				
nr.	Bar			cm/min	omdr/min	m	
1	7	400	36	5	5-10	5,2	Dyser:
2	7	400	36	5,5	8	5,7	Vann 1,8mm
3	7	400	36	5	8	5,7	Grout 8 mm
4	7	320- 375	30	4-5	8	5,4	
5	7	350	30	4-5,5	8	5,7	
6	7	375	30	4-5	8	5,7	

Etterundersøkelser.

Pelerekkene ble framsjaktet på en side i 1,5-2 m dybde.

Gravingen avdekket en varierende utbredelse av pelene, men med en klart definert overflate av herdet materiale. Ut av overflaten stakk det flere steder pinner og kvist som bekreftet et visst innhold av treverk lokalt i grunnen.

Det ble boret ut vertikale kjerneprøver fra samtlige seks peler, samt skrå borer i 45° vinkel i to peler. Det ble totalt boret 21,7 m.

Ca 25 % av utboret lengde ga fast, herdet kjerne- materiale. Resten var likt fordelt mellom løsmasser og kjernetap.

Målt trykkfasthet for den faste delen av kjerne- materialet lå i området 5,3-21 MPa, med middelerdi 10 MPa.

I tillegg til kjerneboringene ble det foretatt gjennom- boring av pelene med fjellkontrollutstyr og registrer- ing av borsynk mot tid. Registreringene lå i området 6-20 sek. pr 25 cm, mens de i ubehandlet grunn lå jevnt på 5-6 sek. pr 25 cm.

Vurdering.

Frigravingen viste at det så langt en kunne observere var et kontinuerlig skall av herdet materiale i periferien av pelene.

Totalt sett gir boringene inntrykk av en tilfeldig og uregelmessig variasjon i pelematerialets konsistens.

Borsynk-registreringen viste også at de forsterkede massene i hovedsak var fastere enn ubehandlet grunn.

Brua ble derfor anbefalt fundamentert på såle på jetpelene etter at disse var avrettet. For sikkerhets skyld ble brua forberedt for jekking.

Oppfølging ved nivellement viser at brua er tilnærmet setningsfri etter et halvt år.

Nærmere detaljer er gitt i Veglaboratoriets rapport D-151A.

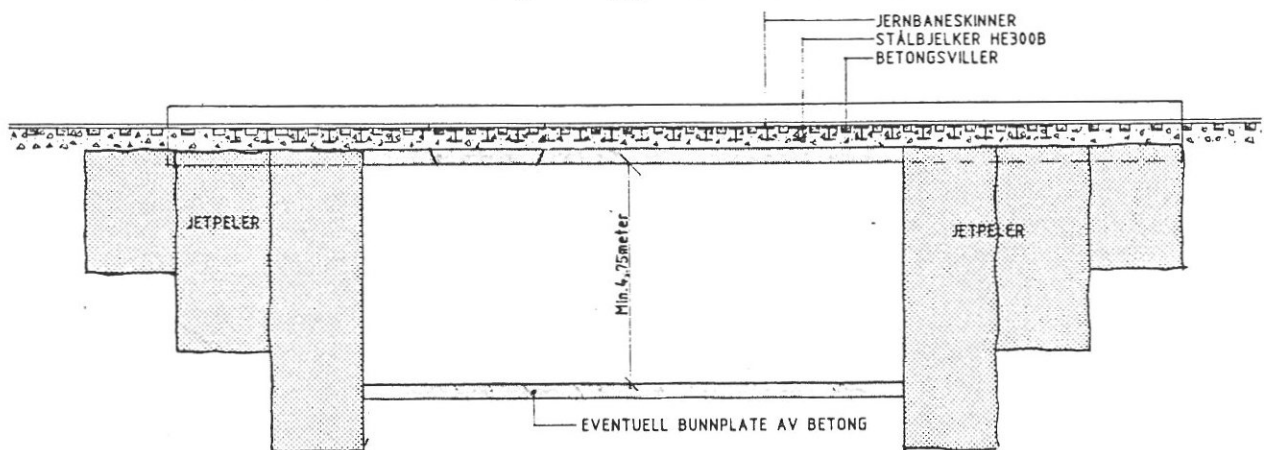
2.4 JERNBANEUNDERGANG VED MOEN.

Prosjektet gjaldt bygging av jernbaneundergang for fylkesveg H 553 vest for Nordagutu i Telemark.

Undergangen ble prosjektert i to alternativer. Det ene gikk ut på omlegging av jernbanen, utgraving og bygging av plasstøpt betongkulvert.

I det andre alternativet var målet å unngå omlegging av jernbanen ved å injisere sammenhengende rekker av jetgrout-peler i jernbanefyllingen, plassere en pre-fabrikert bruplate på disse og så grave ut undergangen.

Det ble innhentet tilbud på begge alternativer.



Figur 9. Moen. Løsningsforslag for jernbaneundergang.

Grunnforhold.

Jernbanefyllingen består hovedsaklig av sandig grus, men ved prøvegraving er det også funnet sandig siltig leirig materiale med innslag av stein og blokk.

De naturlige masser i skråningen ved siden av og under jernbanefyllingen består av sandig siltig grusig materiale i 1,5-2 m dybde.

Det er observert forekomster av stein og blokk i øvre 1 m av massene.

Prøvepeler

Det ble satt ned foringsrør og injisert 3 prøvepeler i begynnelsen av oktober 1987. To av pelene ble plassert i jernbanefyllingen med senteravstand ca. 1.4 m.

Prosjektert diameter var vurdert til 1.5 m i forprosjektet. Hensikten var å oppnå en sammenvevd sone mellom pelene og dermed kontinuitet i pelerekken. Pel 1 og 2 ble plassert med en vertikal helning på 20° (70° med horisontalplanet).

I forbindelse med injiseringen av de to pelene ble det registrert en del uregelmessigheter, blant annet manglende retur av utspylt masse for de første 1-1.5 m av peleproduksjonen. Det ble i begge tilfellene registrert lekkasje av sementslam ned i en bekkekulvert under jernbanefyllingen. På grunn av problemer med å opprettholde trykket ble pel 2 produsert med lavt erosjonstrykk (200 bar) de første 2.85 meter.

Produsert lengde var 3.45 meter for pel 1 og 3.65 meter for pel 2. Pelene var noe forskjøvet i nivå.

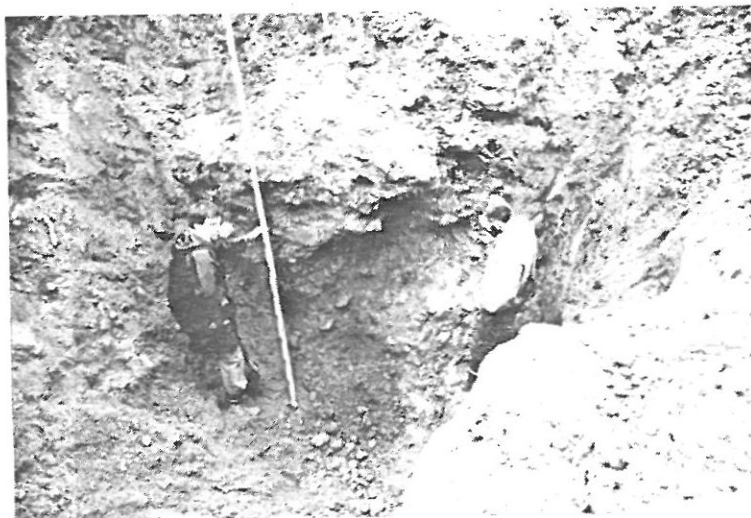
Pel 3 ble satt i naturlige masser ovenfor jernbanefyllingen, ca profil 7965 - 6 mV. Det ble registrert liten retur av utspylt masse de første 1 - 2 m.

Produksjonsparametrene var som vist nedenfor:

P E L nr.	T R Y K K			LØFTE- HASTIGHET	ROTASJON	PRODUSERT LENGDE	MERKNAD
	LUFT	VANN	GROUT				
	Bar						
1	7	350	30	5	8	2.3	Dyser: Vann 1,8mm Grout 8 mm
	7	230	10	7	8	1.2	
2	1	200	36	5	8	2.9	
	3-6	400	30	6	8	0.8	
3	7	380	30	4	8	4.5	

Etterundersøkelser

Frigraving av pel 1 og 2 viste en forholdsvis ujevn overflatestruktur. Den sammenvevde sonen mellom pelene var også av varierende tykkelse.



Figur 10. Frigravde peler, pel 1 (t.h.) og pel 2 (ved målestang).

Pel 3 hadde diameter ca. 2m i toppen, avtagende fra ca. 0.5 m dybde.

Kjerneboring med lett utstyr ga fastkiling av borkronen i løst grusig materiale ca. 70 cm under peletopp. Ved graving brakk pel 3 med en skrå bruddflate fra 0.5 til 1.5 m dybde. Bruddflaten besto av løst, sementholdig materiale.

Videre graving viste at pelematerialet var av tilnærmet samme fasthet som de omkringliggende naturlige masser. Materialprøver viste innhold av sement, men uten at denne hadde noen sammenbindende effekt.

Kjerneboring ble senere foretatt med tyngre utstyr i pel 1 og 2. Det ble utført aksiell gjennomboring av begge pelene samt den sammenvevde sonen mellom pelene.

Videre ble det foretatt skrå gjennomboringer av begge pelene.

Kjernematerialet hadde i hovedsak fast, betonglignende karakter. Det var imidlertid soner med løsere struktur. Boringene ga grunn til å anta at disse kunne være gjennomgående i enkelte nivåer.

De deler av kjernematerialet som lot seg kappe i prøvestykker ble undersøkt med hensyn på trykkfasthet, spaltestrekkfasthet, densitet og frostbestandighet.

Midlere trykkfasthet for betongdelen av kjernematerialet lå på 16MPa. Laveste trykkfasthet på intakt prøve-stykke ble målt til 4.8 MPa. Gjennomsnittlig strekkfasthet var 2.0 MPa.

Målingene av densitet viste verdier fra 1.8 - 2.5 g/cm³ med de laveste verdiene for den øverste halvmeteren av hver pel. Årsaken synes å være mindre andel av tilslagsmateriale. Tilslaget vil naturlig nok synke ned i injiseringsmassen, mens den letteste delen av grouten vil flyte opp og danne en sementkake på toppen.

Fryse/tine-forsøkene ga oppsprekking og brudd i de fleste prøvene ved mindre enn 48 frostvekslinger.

I forbindelse med bygging av ny jernbaneundergang ble de to sammenvevde pelene helt frigravd.

Pelenes overflate ble helt rensket med gravemaskin. De to pelene var fullstendig sammenvevd.

Diameteren på pel 1 varierte mellom 1.5 - 1.8 meter. Diameteren på pel 2 var mer uregelmessig. De øverste 100 cm hadde en diameter på ca 1.8 m, de neste 150 cm hadde en diameter på 0.6 -1.0 meter, mens de nederste 100 cm hadde en diameter på ca 1.5 meter.

Etter måling ble pelene pigget i biter ved hjelp av en tilstedeværende Brøyt. Pelene viste seg å ha sement fordelt over hele volumet. Unntatt fra dette var et horisontalt skikt ca 1 m under toppen av pelene, hvor det var 1 - 3 cm med masser uten innslag av sementpasta. Massene besto her av silt med grusinnslag.

Karakteristisk for pelene var fordelingen av tilslagsmaterialet (stedlige masser) i pelene. Øverst var det ren sementpasta, med økende mengde og dimensjon av tilslag desto lengre ned i pelene man kom. Nederst i pelen var det kulestein med diameter 2 - 10 cm som var bundet sammen med sementpasta. Dette skyldes dels at det ved underkant av pelene var et relativt åpent steinsjikt, dels at det groveste tilslagsmaterialet ikke blir løftet opp til overflaten, men synker ned i grouten.

Sammenligning av den visuelle analysen med kjerneprøver

Beskrivelsen av kjerneprøvene viser både soner med kjernetap så vel som soner med løsmasser. Disse sonene ville blitt registrert i forbindelse med pigging av pelene.

Fastheten i pelene var noe varierende, men utover det tidligere beskrevne sjikt med løsmasser var det ikke mulig å registrere volum uten bindemiddel. Dette tyder på at en med det anvendte kjerneborutstyr spyler ut bindemidlene i de mindre faste materialene.

Ved tilsvarende forsøk med kjerneboring i sementstabilisert grus (Cg) har kjerne vært oppnådd i materiale med fasthet større enn ca 2 MPa. Materiale med lavere fasthet enn dette kan ikke betraktes som betong, men har egenskaper som ligner mer på godt komprimert, velgradert jord.

Vurdering

Prøveproduksjonen viste at det lot seg gjøre å produsere jetinjiserte peler i jernbanefyllingen, mens man i de naturlige massene på stedet hadde problemer med å etablere en pel med tilfredsstillende diameter og til forutsatt dybde.

En av pelene i jernbanefyllingen hadde mindre diameter enn forutsatt på grunn av feil ved produksjonsparametrene (lavt erosjonstrykk), men det ble oppnådd en sammenvevd sone mellom pelene.

Frigraving og dissikering av pelene i jernbanefyllingen viste at sementpasta var godt fordelt i pelevolumet.

Pelens overflatestruktur og materialets beskaffenhet tilsa et behov for avretting og kledning på de flater som måtte bli avdekket ved utgraving, og isolasjon av de flater som eksponeres for frost.

Boringene viste at pelene hadde soner med forholdsvis lav fasthet. Årsaken til disse kan være uregelmessigheter i utstyrets funksjon i produksjonsfasen eller manglende evne til å erodere massene i enkelte lag.

Trykkfastheten i den faste delen av pelematerialet er tilfredsstillende. Det knytter seg imidlertid vesentlig usikkerhet til utbredelsen av de sonene hvor kjerneboringene indikerer løsere materiale, og disse sonenes innvirkning på pelens evne til å oppta og overføre vertikal- og horisontalkrefter.

For eventuell anvendelse av jetinjisering i dette prosjektet fant man det nødvendig å kreve bedre kontroll- og styringsrutiner i produksjonsfasen som kunne sikre kontinuerlige peler av jevn kvalitet og utbredelse.

Ved anbudsåpning viste det seg at prisen for en konvensjonell utførelse med omlegging av jernbanen og plasstøpt betongkulvert lå ca. 20 % lavere enn jetinjiseringsalternativet. Plasstøpt betongkulvert ble derfor valgt som utførelsesmetode.

Jetinjiseringsalternativet omfattet ca. 360 løpemetere peler med prosjektert diameter 1.5 m. Ut fra foreliggende priser i anbudet framkommer en enhetspris på 4500 kr/m³. Denne omfatter rigg, forboring med Odex og jetinjisering.

Nærmere detaljer vedrørende forsøksplanene er beskrevet i Veglaboratoriets rapport H-229A.

3. TOLKING AV RESULTATENE FRA PROSJEKTET

Generelt

De fire prosjektene er alle utført i forbindelse med aktuelle vegprosjekter. I ett av prosjektene (Børja bru) inngår pelene som permanente konstruksjonselement som overfører lastene til bæredyktig grunn.

I de tre andre prosjektene er pelene etablert for å kalibrere metoden mot de stedlige grunnforhold.

Pelenes utbredelse

Før prosjektene ble gjennomført var det knyttet stor spenning til hvilke peledimensjoner som kunne oppnås. Tidligere erfaringer samt teoretiske betraktninger viste at størrelsen på injeksjonssonen ville kunne variere ut fra følgende parametre:

- a: Jordarten
- b: Jetstrålens erosjonstrykk og dyseåpning
- c: Rotasjonshastigheten
- d: Løftehastigheten

a) Jordarten

Erfaringene viser at en har oppnådd relativt homogene peler i sand. I masser med grov grus, stein og blokk, og i morene har det vist seg vanskelig å erodere massene og oppnå peler med tilfredsstillende innblanding av sementgrout. Peler satt i siltmasser viser også varierende konsistens, men innholdet av kvist i massene kan ha vært en forstyrrende faktor i produksjonsprosessen.

Pelene på Elverum og Børja bru, etablert i sand og silt, hadde en noe uregelmessig overflate med utstikkende nåler og bremmer, men hadde overalt en klart definert overflate av jetinjisert masse.

b) - d) Jetinjiseringsparametre

I forbindelse med hvert prosjekt ble jetinjiseringsparametrene variert for at vi skulle få oversikt over hvilken innvirkning disse har på pelens form og utbredelse. Konklusjonen på disse analysene er følgende:

- Pelens diameter er helt avhengig av erosjonstrykket.

Imidlertid var det ikke mulig å finne noen sikker analytisk funksjonssammenheng mellom erosjonstrykk og pelediameter. Med erosjonstrykk på 400 - 450 bar vil en ut i fra disse prosjektene kunne vente å oppnå følgende pelediameter, avhengig av jordartens pakningsgrad:

Sand	: 2.0 - 2.5 m
Silt	: 1.5 - 2.5 m
Morene:	1.0 - 1.5 m

Injiseringstrykket har så langt vi kan se ingen direkte innvirkning på pelens utbredelse. Det er imidlertid en klar forutsetning at trykk/dysediameter er så stor at strømmen av grout er stor nok til å fylle opp hele det eroderte volumet.

Rotasjonshastigheten har betydning for pelens overflatestruktur. Ved liten rotasjonshastighet får pelene karakteristiske mager som viser linjene der erosjonsstrålen har gått. Tilsvarende er det også for løftehastigheten. Ved for høy løftehastighet vil en også få mager som viser hvor erosjonsstrålen har gått.

Erfaringene fra de utførte prosjektene, samt tidligere prosjekter, viser at en rotasjonshastighet på 5 rot/min og løftehastighet på 5 cm/min gir god balanse mellom tidsforbruk ved produksjon (3 m pr. time) og en jevnest mulig overflate.

Trykkfasthet

Trykkfastheten vil som for vanlig betong være avhengig av v/c - forholdet samt mengde og type tilslag fra de stedlige løsmasser. Ved alle fire prosjektene er det tatt ut kjerneprøver som er testet for trykkapasitet i laboratorium. Resultatene av disse viser relativt stor spredning.

Trykkfastheten i prøvene fra Elverum viste at kjerneprøver tatt i utkant av pelene hadde langt høyere trykkfasthet enn kjerneprøver tatt lengre inn. Dette kan forklares ut i fra pelematerialets vanninnhold, idet pelene er produsert over grunnvannstanden.

Tilsvarende systematiske variasjon av trykkfastheten over diameteren er ikke observert i de andre prosjektene.

For peler installert under grunnvannstanden i tilsvarende masser får man trolig peler med trykkfasthet tilsvarende den man har i indre sone av peler installert over grunnvannstand.

Frostbestandighet

I forbindelse med tre av prosjektene (Liodden, Elverum og Moen) ble kjerneprøvenes frostbestandighet testet.

Fryse/tine-forsøk ga oppsprekking og brudd i de fleste av prøvene etter 25 - 50 vekslinger, som er ca halvparten av hva vanlig konstruksjonsbetong tåler. Fryse/tine-forsøkene på prøver fra Elverum viste at prøver fra pelenes ytterkant var mer frostbestandige enn prøver tatt lengre inne, noe som sees i sammenheng med tidligere nevnte vanninnhold og tilhørende trykkfasthet.

Årsaken til den relativt lave frostmotstanden skyldes i hovedsak at den jetinjiserede massen ikke inneholder luftporer. Det må derfor være et viktig element i det videre utviklingsarbeide å prøve lufttilførende tilsetningsstoffer i sementgrouten slik at materialets frostbestandighet blir bedre.

Frostbestandig konstruksjonsbetong med lufttilførende stoff tåler ca. 300 frostvekslinger ved fryse/tine-forsøk.

Samlet vurdering. Anvendelsesområder

Forsøkene har avdekket en del forhold av betydning for vurdering av jetinjisering som byggemetode:

- Forekomster av grov grus, stein og blokk synes å gi skygger av erosjonsstrålen og dermed varierende kontinuitet i det produserte pelematerialet.
- Uforutsett produksjonsstans eller ukontrollerte trykkvariasjoner er også forhold som har klar innvirkning på pelenes utbredelse og kontinuitet.

Dette krever bedret overvåking av produksjonsprosessen og nødvendigvis klare prosedyrer som kan kompensere for uregelmessighetene.

- Pelenes overflatestruktur og materialets beskaffenhet tilsier et behov for avretting og kledning på de flater som avdekkes ved utgraving, og isolasjon av de flater som eksponeres for frost.

Behovet for kontroll av produksjonsprosessen og tiltak for å kompensere for uregelmessigheter straks de oppdages blir ytterligere forsterket ved at feilene senere kan være vanskelige å oppdage, eller at de tidligst kan oppdages under utgraving ved konstruksjonselementer som allerede forutsettes å være fullt ut lastbærende.

For å unngå problemer må man etter driftsstans gå ned ca 40 cm i forhold til det nivået man er på ved stansen, før produksjonen gjenopptas. På denne måten får en også erodert sonen med nedrast materiale.

For videre anvendelse i Statens vegvesen synes metoden å ha sin største aktualitet som konstruksjonselement i sandavsetninger og ellers i forbindelse med grunnforsterkning og underpinning av eksisterende konstruksjoner.

For at jetinjiserte peler skal kunne ha et større teknisk potensiale som konstruksjonselement synes det interessant med en utvikling i retning mot å injisere en mer betongliknende grout. Dette sammen med bedret produksjonsstyring vil eventuelt kunne gi mulighet for et større anvendelsesområde for metoden.

L. Ø. HOKSRUD

1.0 TEKNISK BESKRIVELSE AV METODEN

JETINJISERINGSTEKNIKKEN INNEBÆRER AT JORDSTRUKTUREN LØSES OPP VED HJELP AV EN HØYTRYKKS VANNSTRÅLE OMSLUTTET AV LUFT (JETSTRÅLE), HVORETTER DET INJISERES MED ET BINDEMIDDEL, VANLIGVIS EN CEMENTSLURRY. SÅLEDES ER DET MULIG Å BYGGE OPP PELER OG VEGGPANELER ELLER UTFØRE TETTING OMKRING KONSTRUKSJONER (WING-JET).

Gjennom lang tid har det vært kjent at høytrykks vannstråle (jetstråle) har evne til å erodere og å skjære gjennom harde materialer. I slutten av 1960-årene startet japanerne og russerne undersøkelser om hvorvidt disse egenskaper kunne komme til anvendelse innenfor bygnings- og anleggsteknikken. Omfattende undersøkelser utført ved Kajima Institute of Construction Technology viste at det var det aksielle dynamiske trykket fra vannstrålen som var av størst betydning for erosjonsegenskapene i jord. Kavitasjon, de enkelte dråpers støtkraft, jordas styrke mot dynamisk belastning, samt deres fysiske og kjemiske egenskaper, er også av vesentlig betydning.

Undersøkelsene viste dessuten at jetstråle-effekten er langt lavere i vann enn i luft, mens forandringer i vannets viskositet har liten innvirkning. Det aller meste av jetinjiseringen vil utføres under grunnvannsnivå. For å oppnå den ønskede effekten så har man omsluttet vannstrålen av en konsentrisk luftstråle.

For jetinjiseringsformål er det således utviklet et spesielt injiseringshode (monitor), fig. 1. Dette har tre ulike munnstykker, ett munnstykke for vann, ϕ 1-2 mm som omsluttet av et luftmunnstykke, samt et injiseringsmunnstykke ϕ 7-8 mm. Vann, luft og injiseringsmiddelet mates fra terrengoverflaten til "monitoren" via en svivel gjennom et rør med tre separate kanaler ("trio-pipes"). Kombinasjon av mengde og trykk av de ulike komponenter tilpasses jordart, konstruksjonstype osv., og er til nå vesentlig basert på erfaringer.

L. Ø. HOKSRUD

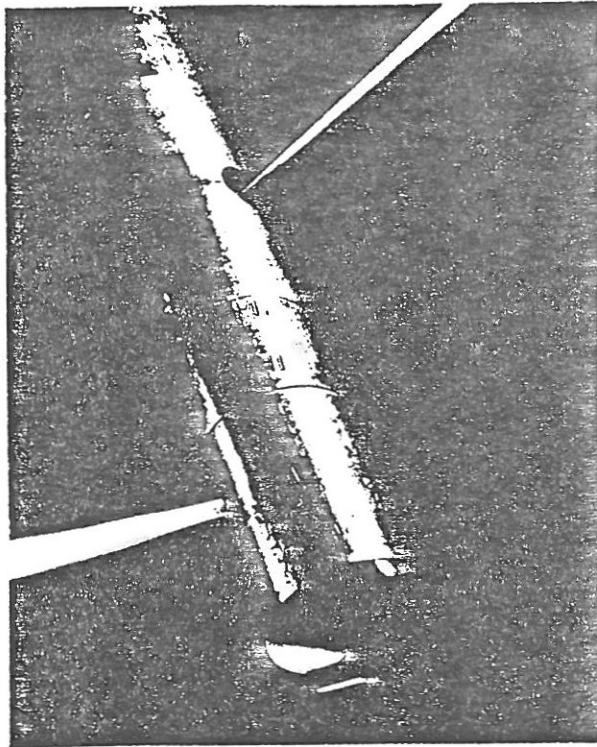


Fig. 1: Bildet viser et injiseringshode (monitor) hvor en høytrykks vannstråle og en konsentrisk luftstråle blir pumpet ut i det øvre munnstykket samtidig som cementslurry pumpes ut fra et lavere munnstykke i motsatt retning, for å kompensere det oppspylede materiale og fylle det tomrom vannstrålen har skapt.

Det settes ikke noe krav til type bindemiddel men hittil har det vist seg teknisk/økonomisk mest fordelaktig å anvende en blanding av cement og vann i forholdet 1:1 - 1:2. Både standard og rapidcement kan benyttes. Hvor det stilles strenge krav til tetthet av injeksjonsmassen, kan cementen blandes med bentonitt.

En skiller vanligvis mellom tre hovedtyper av jetinjiserte konstruksjoner. De har fått betegnelsen:

Jetpeler

Jetpaneler

Wingjet

Figur 2 viser at tilvirkning av jetpeler kan deles i tre faser:

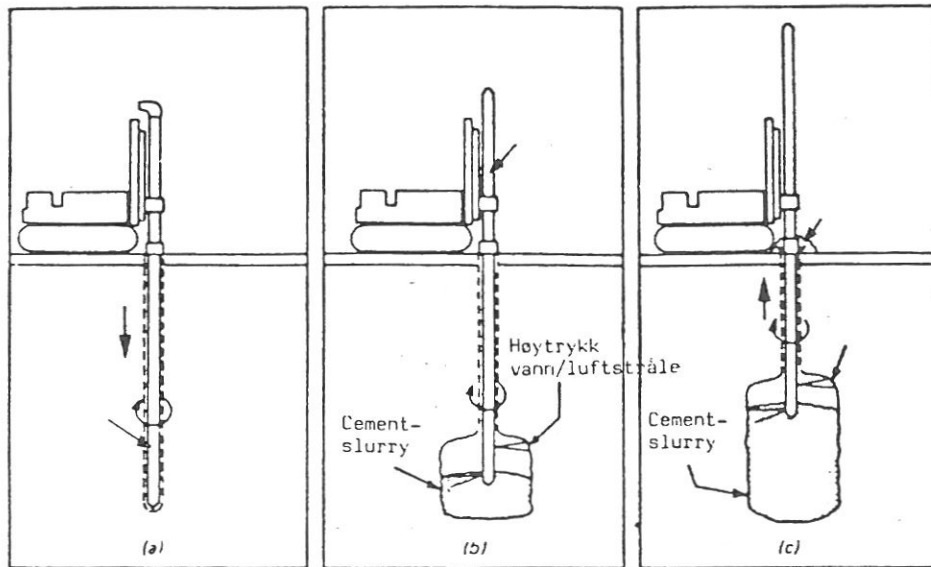


Fig. 2: Tilvirkning av jetpeler.

- a) Boring av pilothull med ønsket dybde.

Det bores først et pilothull med diameter ca. 150 mm ned til ønsket nivå for bunn av pel. Borhullsveggene stabiliseres med et foringsrør eller tung væske.

- b) Injisering starter samtidig som monitor roteres.

Borstål og borkrans dras opp og injeksjonsrøret (monitor) senkes ned i hullet. Under langsom rotasjon trekkes injeksjonsrøret oppover med konstant hastighet. Det etableres således en pel ved at vann og luft under høyt trykk bryter ned kornskjelettet og løser opp jorda i en avstand ut fra sentrum av hullet samtidig som injeksjonsmiddel sprutes inn i det oppløste jordvolumet.

- c) Monitor løftes og roteres. slurry strømmer opp gjennom hullet til overflaten hvor det fjernes.

Under injetseringen strømmer overskudds-slurry bestående av jord, vann og en del cement opp gjennom pilothullet. Slurryen kan enten deponeres i sedimentasjonsbasseng eller pumpes opp i beholdere for bortkjøring. Slurryen herdes med tiden.

Gjennom erfaringer og testforsøk er det oppnådd pelediametere på ca. 0,8 - 4,0 m, avhengig av jordart og utførelse. De kan enten plasseres enkeltvis eller sammen i rekker med overlapping, avhengig av det aktuelle forsterkningsbehov.

L. Ø. HOKSRUD

Fremgangsmåten ved konstruksjon av paneler (skjermer) har flere fellestrekk med peler, figur 3, og kan også deles i tre faser (a), (b), (c).

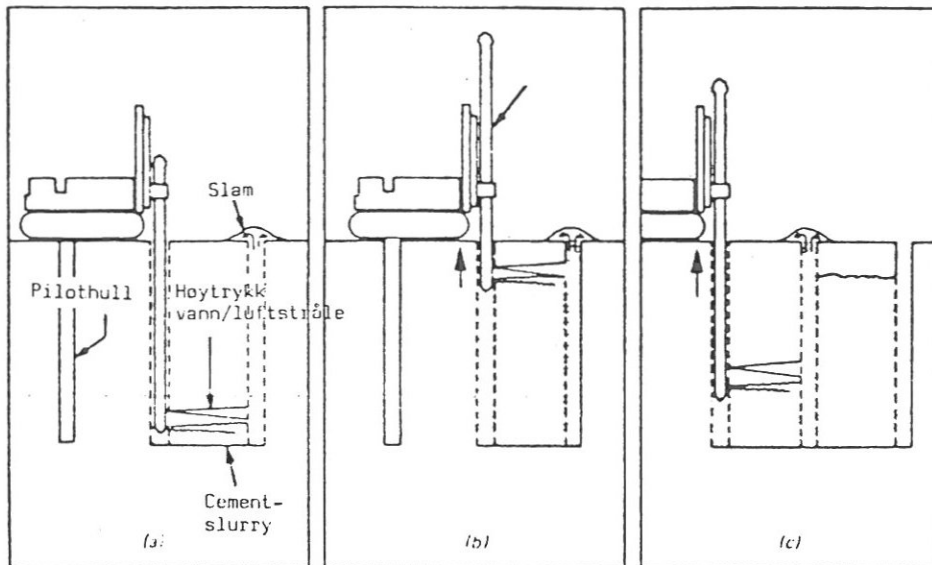


Fig. 3: Tilvirkning av jetpaneler.

- a) Monitoren senkes ned i et av pilothullene og orienteres mot et nabohull og injisering starter.
 - b) Under injiseringen strømmer overskuddslurry opp gjennom nabohullet.
 - c) Når et panel er avsluttet, flyttes monitor til neste pilothull osv.
- a) Det bores flere pilothull, ϕ ca. 150 mm langs den ønskede retningen av panelene. Avstand mellom pilothullene tilpasses grunnforholdene, men varieres i størrelsesorden 0,5 - 3,0 m. Borstål og borkrans dras opp og monitoren senkes ned i et av hullene med jetstrålens munnstykke orientert mot nabohullet.
 - b) Det etableres således et panel mellom to hull ved at monitor løftes (uten rotasjon) med kontrollert hastighet, og luft og vann bryter ned og løser opp jordstrukturen mellom hullene, samtidig som injeksjonsmiddelet sprutes inn i den oppløste jorden. Overskuddslurry strømmer opp gjennom nabohullet under injiseringen. Dette fjernes ved hjelp av en slampumpe, som for jetpeler.

L. Ø. HOKSRUD

- c) Når et panel mellom to hull er ferdig, flyttes monitor til neste hull og samme prosedyre gjentas.

Jetpaneler vil ha en tykkelse i størrelsesorden 5 -30 cm med bredde varierende fra 0,5 - 3,0 m. Avhengig av jordart og utførelse tilpasses høyden etter behov. Panelene trenger ikke fullføres helt opp til terrengoverflaten, men kan like godt begrenses mellom to nivåer under overflaten.

Wingjet er en mellomting mellom jetpel og jetpanel. Det bores et pilothull på vanlig måte som for jetpeler.. Monitoren er derimot forsynt med to eller tre munnstykker dreid ca. 45° i forhold til hverandre. Således er det mulig å injisere en sektor uten at monitoren roteres. Overskuddslurryen transporteres opp gjennom samme hull som monitoren senkes ned. I figur 4 er det vist et eksempel på hvordan wingjet kan anvendes ved tetting mellom stålrørspeler i en avstivet byggegrop.

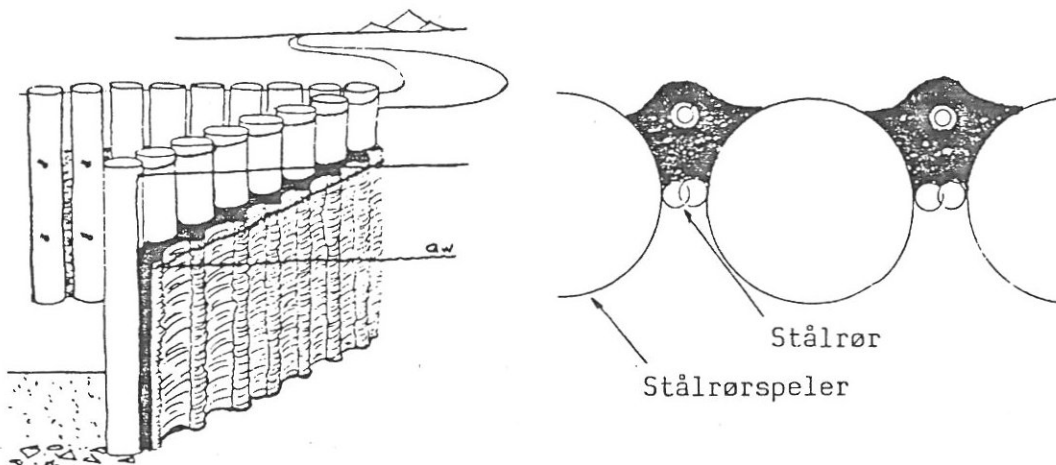


Fig. 4: Ved konstruksjon av wingjet injiseres bare en sektor omkring pilothullet. Her er dette anvendt som tetting mellom stålrørspeler ved avstiving av en byggegrop.

Jetinjering fordrer tilgang på flere typer utstyr, figur 5.

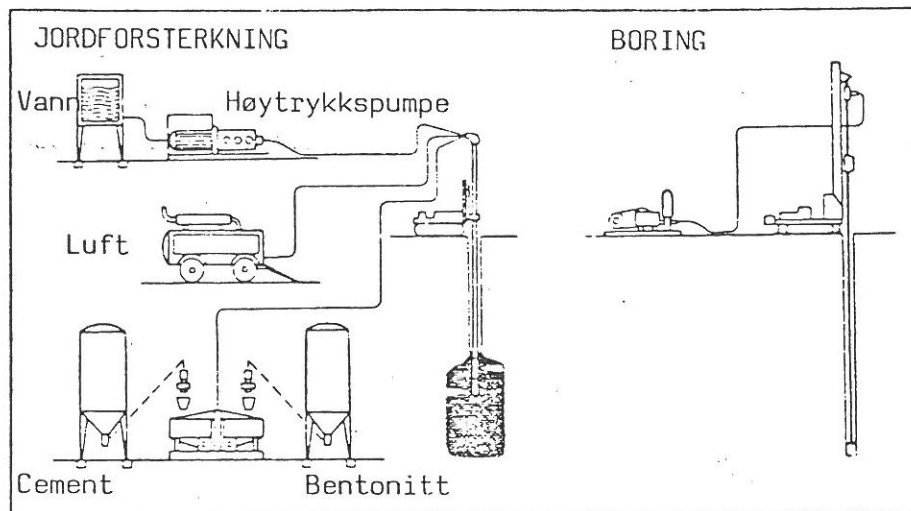


Fig. 5: Nødvendig utstyr for utførelse av jetinjering.

Nødvendig utstyr omfatter blant annet:

Bormaskin for boring av pilothull.
Pumper, murblender etc. hvis stabilisering
av hullet er påkrevet.

Injeksjonsutstyr:

Løfte- og rotasjonsutstyr for monitor.
Vannpumpe, 70 - 80 l/min, ved 40 - 50 MPa-trykk.
Injeksjonsmiddelpumpe, 200 l/min. ved 4 MPa-trykk.
Kompressor, ca 10 m³/min.

Blandingsutstyr for injeksjonsmiddel:

Cementsilo, evt. bentonittsilo, blandemaskin samt
buffertank. Alternativt kan injeksjonsmiddelet
leveres i en rotorbil og da er det tilstrekkelig
med buffertank.

Pumper, oppsamlings- og transportutstyr for over-
skuddslurry.

1.1 TEKNISKE DATA

Pilothullet bores først med foringsrørboring, diameter 139 mm, type Jetex, (vannspylt slukborhammer), Injiseringshode (monitoren) monteres i hullet før foringsrøret trekkes opp. Verdiene for produksjonsparameterene og konstruksjonskapasiteten (styrke, deformasjon og permeabilitet) forutsettes beregnet før produksjon av peler/skjerm igangsettes.

1.2 Generelle verdier.

- Vanntrykk: 300 - 500 bar
- Vannforbruk: 50 - 70 l/min.
- Lufttrykk: 3 - 7 bar
- Cementtrykk: 20 - 30 bar
- Cementforbruk: 140 - 200 l/min.
- V/C-forhold: 1 : 2
- Rotasjonstid: 3 - 15 omdreininger
- Stigehastighet: 3 - 15 cm/min.

1.3 Fordeler/ulempes:

Jetinjiseringsmetodens fordeler er:

- Metoden kan utføres i de fleste jordarter.
- Den kan utføres eksakt på det nivå som ønskes.
- Den er geometrisk bestemt.
- Den kan utføres i områder hvor det ligger ledningsnett.
- Den forårsaker små vibrasjoner og relativt lite støy.
- Den kan utføres under bestående konstruksjoner og i trange områder.
- Den kan utføres helt uavhengig av andre entreprenørarbeider.

Jetinjiseringsmetodens ulemper er:

- Slamhandling. Det slammet som blir spylt opp til jordoverflaten inneholder noe cement (10 - 15%). Det innebærer at slammet størkner med tiden. (Som resurs kan det anvendes til plastring og tetting av f.eks. kommunale søppelfyllinger).
- Metoden er ny og relativt ukjent.