

nr. 105

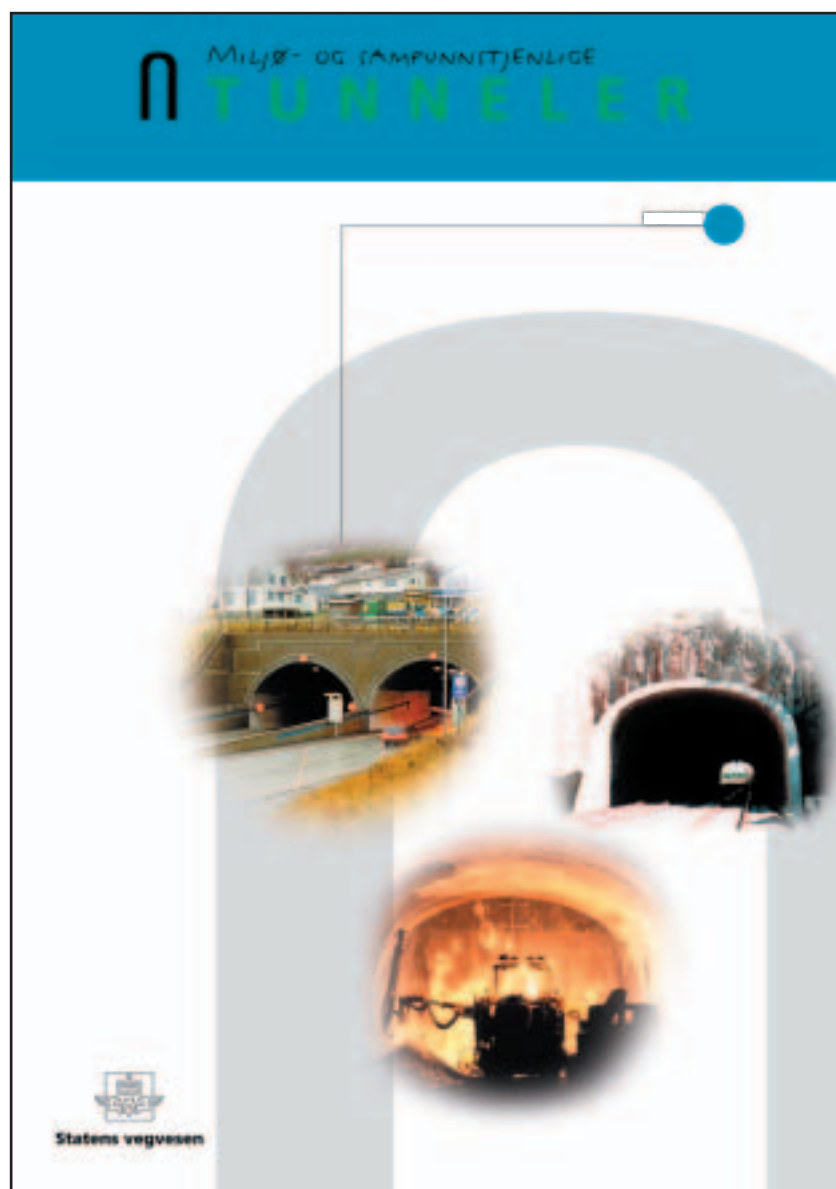
# Publikasjon



Statens vegvesen

## MILJØ- OG SAMFUNNSTJENLIGE TUNNELER

### Miljø- og samfunns- tjenlige tunneler – Sluttrapport



Teknologiavdelingen

# Publikasjon nr. 105



## Miljø- og samfunnstjenlige tunneler - Sluttrapport

Mona Lindstrøm  
*Vegdirektoratet*

Alf Kveen  
*Vegdirektoratet*

Omslagsdesign: *Svein Aarset, Oslo*  
Produksjonskoordinator: *Helge Holte, Teknologivdelingen*  
Trykk: *Lobo Media AS, Oslo*  
Opplag: 1000

# Forord

Miljø- og samfunnstjenlige tunneler er et forsknings- og utviklingsprosjekt som har samlet store deler av tunnelbransjen i Norge til felles innsats for å heve kompetansen for å unngå utilsiktet grunnvannssenkning i forbindelse med tunnelbygging.

Arbeidet har foregått i tre delprosjekter: Forundersøkelser  
Samspill med omgivelsene  
Tetteteknikk.

Prosjektet har hatt en enestående mulighet til å prøve ut og sammenligne en rekke nye metoder, utstyr og teknikker parallelt med bygging av utvalgte tunneler. I tillegg er erfaringer fra både grunnundersøkelser og tetting av gjennomførte anlegg samlet inn og evaluert.

Vi har med de nye metodene mulighet for å få ut mer presis kunnskap om grunnforhold og om sårbare naturtyper. Dette gjør at vi kan sette inn de nødvendige tiltak i forhold til tetting av tunnelen og anvende riktig metode, utstyr og kompetanse. Resultatene fra prosjektet utgjør et viktig grunnlag for optimal planlegging, prosjektering og gjennomføring av tunnelprosjekt, i forhold til grunnvann- og poretrykkskontroll.

Resultatene fra arbeidet er utgitt i en egen rapportserie og er sammenfattet i følgende fem publikasjoner:

Publikasjon nr. 101: Riktig omfang av undersøkelser for berganlegg

Publikasjon nr. 102: Sluttrapport delprosjekt A Forundersøkelser

Publikasjon nr. 103: Undersøkelser og krav til innlekkasje for å ivareta ytre miljø

Publikasjon nr. 104: Berginjeksjon i praksis

Publikasjon nr. 105: Miljø- og samfunnstjenlige tunneler; Sluttrapport.

Denne publikasjonen (nr. 105) omhandler prosjektgjennomføringen og gir en oversikt over aktiviteter og resultater i de enkelte delprosjektene.

*Styret i bransjeprosjektet består av følgende firmaer:*

Statens vegvesen (prosjektledelse)

Jernbaneverket (prosjektformann)

Norges forskningsråd, NFR

NCC AS

Selmer Skanska AS

Veidekke ASA

Norconsult AS

Norges geologiske undersøkelser, NGU

Norges Geotekniske Institutt, NGI

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, NTNU.

*I tillegg har følgende bidratt:*

Norsk vandbygningsskontor, NVK AS

SINTEF Bygg og miljø

NOTEBY AS

GeoVita AS

Aquateam – Norsk vannteknologisk senter AS

Norsk institutt for naturforskning, NINA

Jordforsk

Geoteknisk Spiss-Teknikk AS

Nick Barton & Associates Rock Engineering

Geomap AS

Rockma

Samferdselsetaten i Oslo.

*Teknologiavdelingen, januar 2004*

# SAMMENDRAG

«Miljø- og samfunnstjenlige tunneler» er et omfattende bransjeprojekt som har pågått i perioden 2000–2003, støttet av Norges forskningsråd. Representanter fra byggherre, entreprenører, konsulenter, forsknings- og utdanningsinstitusjoner har samarbeidet med felles mål om å utvikle metoder for å unngå lekkasjer i forbindelse med tunnelbygging.

Arbeidet har foregått i tre delprosjekter:

## *Delprosjekt A Forundersøkelser*

Flere nye metoder for forundersøkelser, hovedsaklig geofysiske metoder som tidligere ikke har vært benyttet til tunnelprosjektering, er utprøvd og evaluert. Resultatene viser at vi med relativt enkle metoder kan få et bilde av bergkvalitet, forløp av svakhetssoner og lekkasjepotensiale i dypet, i de fleste tilfeller ned til tunnelnivå. Geofysiske og satellitt-baserte metoder viser regionale strukturer, også i områder med stor løsmasseoverdekning og i tettbebygde områder. I delprosjektet er det også utarbeidet en ny metode for å definere hva som er riktig omfang av forundersøkelser i forhold til berggrunnsforholdene og de krav som stilles til et tunnelanlegg.

## *Delprosjekt B Samspill med omgivelsene*

Delprosjektet har gjennomgått sårbarhetsvurderinger for naturområder og urbane områder. Det er utarbeidet prosedyrer for å fastlegge krav til innlekkasje til tunnelanlegg som står i forhold til hva et område kan tåle og hva som aksepteres av grunnvannsenkning. Det finnes ingen tilsvarende systematisk gjennomgang av konsekvensvurderinger av grunnvann, åpne vannkilder, vegetasjon og setningsproblematikk i forbindelse med tunnelbygging.

## *Delprosjekt C Tetteteknikk*

Begrepet «aktiv injeksjon» er definert i prosjektet for å beskrive den metoden for systematisk sementbasert forinjeksjon som med stor grad av sikkerhet oppfyller kravene til tetthet. Arbeidet er basert på erfaringer og dokumentasjon av injeksjonsarbeidene ved en rekke vellykkete og veldokumenterte anlegg, og som dekker ulike bergartstyper, lav bergoverdekning og strenge krav til innlekkasje. Metoden innebærer blant annet kontroll med trykkoppbyggingen, vann/ment-forholdet og skjermgeometrien, og kvalifisert oppfølging av injeksjonsprogrammet. Ved å bruke denne metoden er det i dag fullt mulig å gjennomføre teknisk kompliserte anlegg med full kontroll på grunnvannet. Delprosjektet har i tillegg utviklet kunnskap om materialegenskaper for injeksjonssementer og mekanismer for tetting av sprekker i berg.

En doktorgradsoppgave er initiert av prosjektet, med temaet sammenheng mellom regionalgeologi/strukturgeologi og vannlekkasjer i tunneler. Oppgaven vil bli en videreføring av prosjektaktivitetene, og har som mål å utarbeide anbefalte prosedyrer som vil gi sikrere prognoser med hensyn til vannlekkasjer for fremtidige tunnelanlegg.

Resultatene fra prosjektet har gitt tunnelbransjen en mulighet til å ligge i forkant av mulige problem, slik at berørte parter på sikt kan føle seg trygge på at tunneler ikke medfører uønskete innvirkninger på omgivelsene. Arbeidet i delprosjektene er publisert i en serie på 40 fagrapporter og sammenfattet i fire publikasjoner. Denne publikasjonen presenterer en oversikt over arbeidet i prosjektet, med innhold, gjennomføring og resultater.

# INNHOOLD

1 INNLEDNING .....	6
1.1 Bakgrunn .....	7
1.2 Prosjektgjennomføringen .....	8
1.3 Tunnelanlegg som forskningsobjekter .....	10
2 DELPROSJEKT A: FORUNDERSØKELSER .....	13
2.1 Innledning.....	13
2.2 Riktig omfang av undersøkelser.....	14
2.3 Forundersøkelsesmetoder.....	17
2.4 Refraksjonsseismisk modellering.....	25
2.5 Doktorgradsoppgave .....	26
2.6 Erfaringer fra fullførte anlegg .....	27
3 DELPROSJEKT B: SAMSPILL MED OMGIVELSENE.....	31
3.1 Innledning.....	31
3.2 Klassifisering av sårbarhet for naturmiljø.....	32
3.3 Modelleringer .....	33
3.4 Samspill med omgivelsene – sluttrapport .....	37
4 DELPROSJEKT C: TETTETEKNIKK .....	41
4.1 Innledning.....	41
4.2 Testing av injeksjonssementer.....	42
4.3 Injeksjonsstrategi.....	44
4.4 Naturlige tetteprosesser .....	47
4.5 Vanninfiltrasjon.....	48
4.6 Berginjeksjon i praksis .....	49
5 OPPSUMMERING OG KONKLUSJONER .....	55
REFERANSER.....	58
VEDLEGG	
I Deltagerliste.....	63
II Forprosjektet 1999.....	65
II.1 Innledning .....	65
II.2 Forprosjekt A .....	65
II.3 Forprosjekt B.....	67
II.4 Forprosjekt C.....	68
II.5 Forprosjekt D .....	68
III Prosjektrapporter nr. 1–40.....	70

# 1 INNLEDNING

«Miljø- og samfunnstjenlige tunneler» er et omfattende forskningsprosjekt der store deler av tunnelbransjen har samarbeidet for å heve kompetansen og sette fokus på grunnvannsproblematikk ved tunnelbygging. Prosjektet har gått i perioden 2000–2003. Representanter fra byggherre, entreprenører, konsulenter, forsknings- og utdanningsinstitusjoner har deltatt i prosjektet, som er støttet av Norges forskningsråd.

Arbeidet har foregått i delprosjektene:

A: Forundersøkelser

B: Samspill med omgivelsene

C: Tetteteknikk.

Prosjektet har prøvd ut nye metoder for forundersøkelser som har et potensiale til å identifisere problemområder, forløp av svakhetssoner mot dypet og lekkasjepotensiale med større grad av sikkerhet. Denne grad av nøyaktighet er ikke mulig å oppnå med de tradisjonelle metodene. Det er også utarbeidet en ny metode for å anslå hvor stor andel av kostnadene for en tunnel som bør gå med til forundersøkelser ut fra grunnforholdene og de krav som stilles til det enkelte anlegget. Dokumentasjon fra en rekke tunnelanlegg, klassifisert som vellykkete og mindre vellykkete, underbygger denne utredningen.

Prosjektet har gjennomgått sårbarhetsvurderinger for naturområder og urbane områder. Det er utgangspunktet for prosedyrer som fastlegger krav til innlekkasje til tunnelanlegg ut fra hva et område kan tåle av grunnvannssenkning og poretrykksendringer, og hva som kan aksepteres. En slik sammenstilling er ikke gjort tidligere. Den gir svært verdifull informasjon til planleggere og utbyggere som skal påvise og klassifisere spesielt sårbare områder på et tidlig stadium og sette inn nødvendige tiltak.

I prosjektet er det også utført en omfattende gjennomgang av metoder, materialer og utstyr for tetting av tunneler i tillegg til systematisering av erfaringsdata fra en rekke gjennomførte anlegg. Det er utgangspunktet for en metode for enkel og effektiv tetting med sementbasert forinjeksjon som med stor grad av sikkerhet oppfyller kravene til innlekkasje. En doktorgradsoppgave med temaet «forundersøkelser og innlekkasje-problematikk» er initiert av prosjektet, og representerer en videreføring av prosjektaktivitetene.

Store deler av prosjektet har vært spesielt rettet mot praktisk utprøving og oppfølging parallelt med drivingen av utvalgte tunneler, noe som har gitt realistisk og effektivt utbytte av arbeidene. Vi har hatt en sjelden mulighet til å vurdere flere ulike metoder for forundersøkelser mot hverandre og sammenligne med tunneldrivingen.

Denne publikasjonen gir en samlet oversikt over prosjektets innhold, gjennomføring og resultater. Utdypende informasjon om temaene finnes i publikasjonene nr. 101, 102, 103 og 104 samt i resultatrapportene.

## 1.1 Bakgrunn

### Utgangspunkt for prosjektet

Det norske tunnelmiljøet har lang erfaring med bygging av tunneler for samferdsel. Vi har utviklet metoder for tunnelbygging og -sikring tilpasset vår berggrunn, med effektive og kostnadsbesparende løsninger. Imidlertid har filosofien med å foreta deler av undersøkelser av bergforholdene fra stoff samtidig med drivingen ført til at det har vært brukt lite ressurser på grunnundersøkelser, og det har jevnt over vært liten interesse for nye metoder. Forståelsen for hydrogeologiske problemstillinger for vanlige tunneler har heller ikke fått nok oppmerksomhet.

I de fleste tilfellene har dette gått bra, men i flere tilfeller har manglende kunnskap om grunnforholdene ført til store konsekvenser for omgivelsene. Det kom for alvor fram ved de store lekkasjeprobemene ved Hallandsåsen i Sverige og ved byggingen av Romeriksporten, der lekkasjer førte til grunnvannssenkning med påvirkning av naturmiljø og setningsskader på bygninger. Disse to tilfellene satte også søkelys på tidligere, lite vellykkete prosjekter, og bransjen opplevde mye negativ omtale. Det har tidligere ikke vært foretatt noen samlet vurdering av erfaringene fra tunnelanlegg der utilsiktede problemer har oppstått, dels med konsekvenser for omgivelsene og alltid med store kostnadsoverskridelser.

Statens vegvesen og Jernbaneverket som landets største byggherrer for tunneler for samferdsel har et spesielt ansvar for å følge opp planlegging, prosjektering og utførelse av tunnelprosjekter. De slo seg derfor sammen i et felles prosjekt med øvrige sterke aktører i tunnelbransjen i Norge med støtte fra Norges forskningsråd, og med en målsetting om å gjøre tunnelene mer miljø- og samfunnstjenlige.

### Litt om forprosjektet

Den negative omtalen bygg- og anleggsbransjen opplevde i kjølvannet av problemene ved Romeriksporten førte til at flere firmaer og institutter tilknyttet tunnelmiljøet søkte om støtte til utredninger i forbindelse med grunnvannsproblematikk ved tunnelbygging. Norges forskningsråd (NFR) tok initiativ til å samle bransjen i et felles forsknings- og utviklingsprosjekt med den hensikt å heve kompetansen på dette området. Statens vegvesen og Jernbaneverket fikk ledelsen i prosjektet, og sendte i 1998 ut en forespørsel til fagmiljøet om deltagelse. Utfordringene gjaldt blant annet å komme fram til riktig nivå på forundersøkelser, hvordan naturmiljø influeres av grunnvannsendringer og hvordan man i tunneler best mulig kan tette mot skadelige vannlekkasjer.

Prosjektet kom i gang i 1999 med et omfattende forprosjekt som involverte det meste av bransjen, der målet var å: «Konkretisere satsingsområder, strategi og økonomi i et hovedprosjekt». Målsettingen for hovedprosjektet var å:

*«Videreutvikle og forbedre dagens teknologi og gi rom for nye løsninger som medfører mer kostnadseffektiv, bedre, sikrere og mer miljøvennlig bygging av tunneler».*

Resultatene fra forprosjektet ble rapportert i fire delrapporter, utformet som prosjektbeskrivelser for et hovedprosjekt. Det ble utarbeidet en lang rekke interessante forslag til prosjekter, en oversikt over dette arbeidet er gitt i vedlegg II. Prosjektforslagene er beskrevet i henhold til ulike rammer for tildeling av midler, som utgjorde grunnlaget for



søknaden til Forskningsrådet om prosjektmidler. Det ble imidlertid bare tildelt midler til deler av prosjektet, noe som endret mye av forutsetningene for prosjektet, blant annet måtte rene forskningsoppgaver nedprioriteres. Forslagene til innhold i de ulike delprosjektene ble omarbeidet og tilpasset de nye rammene. Arbeidet ble konsentrert om utvalgte satsningsområder, og med større grad av utprøvinger i samarbeid med pågående tunnelanlegg. Delprosjekt C kom i gang på høsten 2000 samtidig med oppstart av byggingen av T-baneringen. Etter en revisjon av prosjektbeskrivelsene kom delprosjektene A og B i gang i 2001. En doktorgradsoppgave i prosjektet kom i gang i 2002.

## 1.2 Prosjektgjennomføringen

Rapport nr. 1 (Davik 2001) i prosjektets rapportserie gir prosjektbeskrivelsen med utgangspunkt i forprosjektet og de reviderte prosjektbeskrivelsene. Innholdet i prosjektet er justert noe underveis basert på resultater og erfaringer, og nye aktiviteter er kommet til. Se oversikten i tabell 1.1.

Tunnelbransjen hadde med prosjektet som målsetting å oppnå:

- større sikkerhet mot miljøskader spesielt relatert til grunnvann
- evaluering av nye og tradisjonelle metoder for forundersøkelser
- bedre økonomisk forutsigbarhet for tunnelprosjektering
- større teknisk og økonomisk sikkerhet ved gjennomføring av tunnelprosjekter
- injeksjonsteknikk er veien til bedre kontroll og sikkerhet.

Aktivitetene har i hovedsak vært nært knyttet til konkrete tunnelanlegg, med praktiske utprøvinger og oppfølging av resultater.

Omkring 30 deltagere fra ulike firmaer har bidratt med å utføre og administrere aktivitetene i prosjektet, og deltatt jevnlig på møter for oppdatering, diskusjon og koordinering (deltagerliste i vedlegg I).

### Resultater og dokumentasjon

Resultatene fra de ulike arbeidene er utgitt fortløpende i prosjektperioden (se referanser og vedlegg III) og er presentert i sluttrapportene (Publikasjon nr. 101–104) fra delprosjektene.

De til sammen 40 resultatrapportene er utgitt i rapportserien til Teknologivdelingen, Vegdirektoratet, og er tilgjengelig i deres arkivsystem. På samme måte er sluttrapportene trykt i Teknologivdelingens serie «Publikasjoner». Publikasjonene gir en oppsummering av ny viten i prosjektet og kan fungere som veiledninger i ulike faser av et tunnelprosjekt.

Nyheter og rapporter er presentert underveis på våre nettsider: [www.tunneler.no](http://www.tunneler.no)

De fleste av resultatrapportene fra prosjektet er lagt ut på nettsidene. Etter prosjektavslutningen overtar NFF-nettstedet [www.tunnel.no](http://www.tunnel.no).

Prosjektet fikk en bred presentasjon på Fjellsprenningsdagen i november 2003 og en grundig omtale i tidsskriftet GEO nr. 7, 2003.

**Tabell 1.1:** Oversikt over aktiviteter og utførende i de enkelte delprosjektene.

<b>Delprosjekt/aktivitet</b>	<b>Utført av:</b>	<b>Tidsperiode</b>
<b>A Forundersøkelser</b>		
A1: Lunnertunnelen	NGU	2001–2003
A2: Riktig omfang av forundersøkelser	Norconsult, NTNU	2003
A3: T-baneringen	NGI, NGU	2002
A4: Frøyatunnelen	NGI	2001
A5: Romeriksporten	(NGU)	(oppgaver overført)
A6: Krokskogen	NGU	2002
A8: Jong–Asker	NGU	2002–2003
A9: Dr.ing.-studium	NTNU	2002–(2005)
A10: Driftsmidler, dr.ing.-studiet	NTNU	2002–2003
A11: Refraksjonsseismisk modellering	NGI, Geomap	2002
A12: Øysand–Thamshavn	NGU	2003
A13: Radar interferometri	NGU	2003
<b>B Samspill med omgivelsene</b>		
B1: Klassifisering av sårbarhet, vegetasjon	NINA	2001–2003
B2: Klassifisering av sårbarhet, vannkilder	Jordforsk	2001–2003
B3: Modelleringer	NGI, Norconsult, Jordforsk	2001–2003
B4: Poretrykk og skader i urbanområder	NGI	2001
B5: Akseptkriterier	NGI	2001
B6: Veiledning	NGI	2003
<b>C Tetteknikk</b>		
C1: Injeksjonssementer	SINTEF	2000–2002
C2: Injeksjonsstrategi	NVK, Geovita, Norconsult	2000–2003
C3: Naturlige tetteprosesser	Aquateam	2001–2002
C4: Vanninfiltrasjon	NGI	2002
C6: Håndbok i injeksjonsteknikk	Statens vegvesen m.fl.	2003
C8: Lab-testing av injeksjonssementer	Noteby	2000–2001
C9: Dokumentasjon	NVK	2000–2003

## Prosjektstyre og budsjett

**Tabell 1.2:** Finansieringsplan for årene 2000–2003, kontantbudsjett (i 1000 kroner).

Firma	2000	2001	2002	2003	Kommentar
Statens vegvesen	300	1000	1000	1000	
Jernbaneverket	300	1000	1000	1000	
Selmer Skanska AS	25	25	25	25	
Veidekke ASA	25	25	25	25	
NCC Anlegg AS	25	25	25	25	
Samferdselsetaten i Oslo	0	100	100	100	
Norconsult AS	0	0	0	0	egeninnsats i timer
NGI	0	0	0	0	egeninnsats i timer
NTNU	0	0	0	0	egeninnsats i timer
NGU	0	0	0	0	egeninnsats i timer
Norges forskningsråd	1000	1900	1700	0	
<b>SUM</b>	<b>1675</b>	<b>4075</b>	<b>3875</b>	<b>2175</b>	

Det totale kontantbudsjettet for prosjektet er 11,8 millioner kroner. I tillegg har prosjektet en egeninnsats på ca. 10 millioner.

Modellen med finansieringspartnere ble satt opp i følge et system som NFR benytter seg av. En rekke firmaer og enkeltpersoner har deltatt med en fastsatt timesats og med 20 % egeninnsats. NGU har deltatt med en egeninnsats på 50 %.

### 1.3 Tunnelanlegg som forskningsobjekter

Store deler av prosjektet har vært spesielt rettet mot praktiske utprøvinger og oppfølging ved pågående tunnelanlegg. Hensikten var å få ut mest mulig data og informasjon direkte. Kriteriene for utvalget var at tunnelene ble ferdig drevet i prosjektperioden. T-baneringstunnelen i Oslo og Lunnertunnelen på rv. 35 passet inn i denne tidsrammen. De representerer både urbane områder og naturmiljø, med utfordringer i forhold til strenge tetthetskrav, og har vært «hovedlaboratoriene» i prosjektet.

Senere ble det besluttet å gjøre en begrenset innsats ved jernbanetunnelene mellom Sandvika (Jong) og Asker, som er et omfattende utbyggingsprosjekt med utfordringer nært opp til prosjektets problemstillinger. Jernbaneverket har hatt et omfattende forundersøkelles- og oppfølgingsprogram over tunnelene, og data var tilgjengelig for prosjektet.

FoU-prosjektet har også innhentet data og dokumentasjon fra forundersøkelser og injeksjonsarbeider ved en rekke andre tunneler. Denne informasjonen danner grunnlaget for doktorgradsoppgaven initiert av prosjektet (se kapittel 2.5).

Arbeidet i prosjektet har gitt en enestående mulighet til blant annet å sammenligne resultater fra ulike forundersøkelser direkte med dokumentasjon fra tunneldrivingen og

utprøvinger av injeksjonsprosedyrer tilpasset den ordinære driften. En egen avtale mellom prosjektet og T-baneringstunnelen ble utarbeidet (se Rapport nr. 1) med beskrivelse av deltagelse av delprosjekt C i samarbeid med entreprenøren.

### **T-baneringstunnelen**

- 1240 m lang fjelltunnel mellom Ullevål og Nydalen i Oslo, som del av den nye T-baneringen. Samferdselsetaten i Oslo er byggherre og Veidekke entreprenør for tunnelen. Byggetiden var fra høsten 2000 til januar 2002
- Delprosjekt C har deltatt aktivt med utprøving av metoder og utstyr i nært samarbeid med tunnelanlegget. Det gjelder bl.a. erfaringer med ulike injeksjonssementer, forsøk med tidsoptimal drift og metoder for driving gjennom en problemsone; en forkastningssone med en syenittgang
- Tunnelen går gjennom kambrosiluriske sedimentære bergarter, leirskifer og knollekalk, som er gjennomslått av en del eruptivganger, hovedsaklig syenitt og diabas
- Tunnelen går under et tettbebyggt område, og på grunn av fare for setninger var det satt krav til innlekkasjer på 7–14 l/min/100 m. Det medførte at det meste av tunnelen er injisert. Området over tunnelen var grundig kartlagt, og erfaringer fra Tåsen-tunnelen på Ringveg 3 like ved ble tatt med i vurderingene.

### **Lunnertunnelen**

- 3,8 km lang tunnel på ny riksveg 35 mellom Grua og Gardermoen. Statens vegvesen Tunnelproduksjon og NCC bygde hver sin del av tunnelen. Gjennomslag var sommeren 2002.
- I Delprosjekt A har NGU prøvd ut nye forundersøkellesmetoder over tunnelen, hovedsaklig geofysiske metoder som hittil er lite brukt i tunnelsammenheng.
- Den vestlige delen av tunnelen går gjennom kambrosilurisk leirskifer og knollekalk, som stedvis er omdannet til hornfels. Rundt Langvatn opptrer syenitt med markert kontakt mot hornfelsen. Videre østover langs traseen finnes vulkanske bergarter av permisk alder. Området gjennomsettes av sprekker og forkastninger med retning N-S til NNØ-SSV.
- Tunnelen går under Langvatnet og naturvernområdet Rinilhaugen, og av den grunn var det satt krav til innlekkasje på 10–20 l/min/100 m på denne strekningen.



**Figur 1.1:** Lunnertunnelen, østre påhugg (foto: Mona Lindstrøm).

### **Jong–Asker-tunnelene**

- To jernbanetunneler, 2,7 og 3,7 km lange. AF og MIKA er entreprenører for hver sin tunnel. Oppstart var i 2002, AFs tunnel hadde gjennomslag sommeren 2003, hele strekningen skal være ferdig i 2005.
- Noen av aktivitetene i delprosjekt A og C er videreført ved anlegget, blant annet utprøving av nye geofysiske forundersøkelingsmetoder. Prosjektet har god tilgang på data fra anlegget og fra overvåkingsprogrammet for grunnvann. Oppfølgingen og dokumentasjonen fra Jong–Asker etter prosjektavslutning blir dels ivaretatt i forbindelse med doktorgradsoppgaven.
- Geologien er også her Oslofeltets bergarter med kambrosiluriske sedimenter, mest leirskifer og kalkstein, som er gjennomvannet av en del permiske intrusivganger (diabas og syenitt).
- Området over tunnelene er tettbebygd, og det er satt relativt strenge krav til innlekkasje i tunnelene (4–16 l/min/100 m). Et omfattende overvåkingsprogram for grunnvann er i gang langs tunnelstrekningen i regi av Jernbaneverket.

## 2 DELPROSJEKT A, FORUNDERSØKELSER

### 2.1 Innledning

Hovedrapporter:

**Publikasjon nr. 101:**

Riktig omfang av undersøkelser for berganlegg

**Publikasjon nr. 102:**

Delprosjekt A, Forundersøkelser – Sluttrapport

Deltagere:

**NGU**

**NTNU**

**Norconsult**

**NGI**

**Statens vegvesen**

**Jernbaneverket**

Målet for delprosjekt A har vært å utarbeide retningslinjer for å anslå riktig omfang av forundersøkelser, og evaluere både nye og etablerte metoder og verktøy med tanke på å få ut de data som er nødvendig for en vellykket gjennomføring av et gitt tunnelprosjekt.

De nye metodene for forundersøkelser er først og fremst geofysiske undersøkelsesteknikker og målemetoder som hittil er lite benyttet ved forundersøkelser for tunneler. Utprøvnings av flere ulike teknikker er utført over Lunnertunnelen. Prosjektet har dermed hatt en enestående mulighet til å sammenligne resultatene og vurdere hvilke metoder, både nye og etablerte, som gir de beste prognosene når det gjelder svakhetssoner og vann. Arbeidet har vist at de nye geofysiske metodene har potensiale til å gi mer detaljert informasjon om berggrunnen enn de etablerte metodene.

Data fra andre ferdige og godt dokumenterte anlegg er også gjennomgått med hensyn til forundersøkelser og registreringer under drivingen for å evaluere prognoser og treffsikkerheten til forundersøkelsesmetodene.

En doktorgradsoppgave er initiert av prosjektet med temaet sammenheng mellom regional-/strukturgeologi og vannlekkasjer i tunneler. Oppgaven vil bli en videreføring av prosjektaktivitetene.

Dette kapitlet gir en gjennomgang av arbeidet i delprosjekt A.

## 2.2 Riktig omfang av undersøkelser



**Publikasjon nr. 101:**  
**Riktig omfang av undersøkelser for berganlegg**  
(A. Palmstrøm, B. Nilsen, K. Borge Pedersen og L. Grundt).

En helt ny metode for å vurdere hva omfanget av grunnundersøkelser bør være for tunneler og andre anlegg er utarbeidet. Arbeidet er utført av Arild Palmstrøm, Norconsult (ansvarlig), Bjørn Nilsen, NTNU, Knut Borge Pedersen, Statens vegvesen og Leif Grundt, Selmer Skanska.

Publikasjonen har som hensikt å gi byggherrer, konsulenter og entreprenører retningslinjer for hvor mye undersøkelser det er fornuftig å utføre under planlegging og bygging av tunneler og bergrom. Hva som er "riktig omfang" er det ikke mulig å gi noe eksakt svar på. Imidlertid er det mulig ved å kombinere visse elementer og krav gi retningslinjer for hva omfanget bør ligge på. Denne aktiviteten ble skissert i forprosjektet, og det ble besluttet at arbeidet skulle utføres i avslutningen av prosjektet slik at nye resultater og erfaringer ble innarbeidet.

I utledningen av hva som bør være riktig omfang av grunnundersøkelser, tas det utgangspunkt i stedlige grunnforhold, type prosjekt og de krav prosjektet skal tilfredsstille og fase av planlegging/gjennomføring. Som utgangspunkt er NS 3480 "Geoteknisk prosjektering" benyttet. Ifølge NS 3480 plasseres anlegget i en geoteknisk prosjektklasse basert på en skadekonsekvensklasse og en definert vanskelighetsgrad. Det samme prinsippet er benyttet i prosjektet ved å definere en undersøkelsesklasse som bestemmes ut fra en klassifisering av berggrunnens vanskelighetsgrad sammenholdt med krav til anlegget, tilsvarende skadekonsekvensklasse.

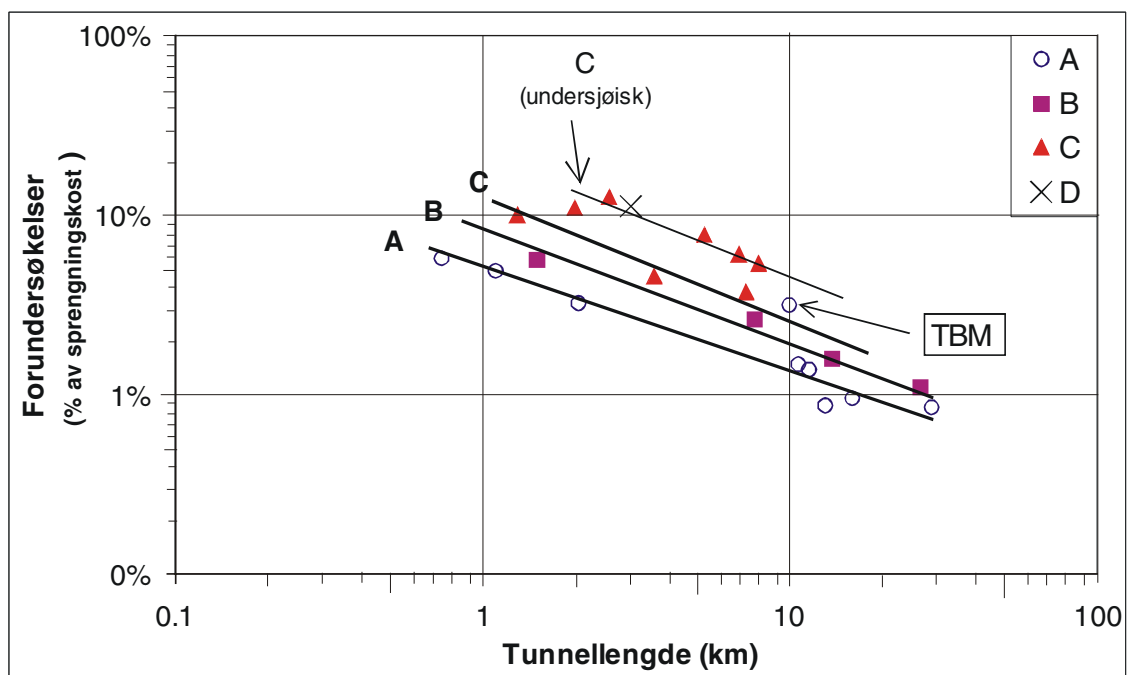
Tabell 2.1 viser definisjonen for undersøkelsesklassene A, B, C og D. Berggrunnens vanskelighetsgrad finnes ved å tallfeste viktige elementer som geologi, forvitring, overdekning og tilgjengelighet til terrenget, som til sammen gir et mål på hvor komplisert berggrunnen er og hva som må til av undersøkelser. Krav til anlegget finnes ved å tallfeste elementer som funksjonskrav, risiko under driving, miljøpåvirkning og påvirkning på andre byggverk. Se Publikasjon nr. 101.

**Tabell 2.1:** Ut fra grunnforholdenes vanskelighetsgrad og krav til anlegget finnes undersøkelsesklassen.

Definisjon av UNDERSØKELSESKLASSE		a: VANSKELIGHETSGRAD		
		a1: Liten	a2: Moderat	a3: Stor
b: Krav til anlegget	b1: Små	A	A	B
	b2: Moderate	A	B	C
	b3: Store	B	C	D

Erfaringer fra 21 utførte anlegg i ulike grunnforhold er kategorisert i forhold til dette systemet. Gjennomgangen omfatter veg- og jernbanetunneler og kraftverktunneler. I et vedlegg til Publikasjon nr. 101 beskrives hvert anlegg og klassifiseres som vellykket eller mindre vellykket. Dataene er brukt i en analyse om hvilket omfang grunnundersøkelsene for hvert prosjekt burde hatt med dagens krav til nøyaktighet på kostnadene.

Tunnelprosjektene er plassert i de nevnte undersøkelsesklassene basert på grunnforhold og krav til anlegget. På dette grunnlaget er det i figur 2.1 framstilt et anbefalt undersøkelsesomfang for de respektive klassene. For en vanlig norsk vegtunnel vil omfanget av forundersøkelsene ligge på 2–10 % av sprengningskostnadene, for undersjøiske tunneler 5–15 % pluss 2–5 % til sonderboring og oppfølging under driving.

**Figur 2.1:** Anbefalt undersøkelsesomfang (kostnader) som funksjon av tunnel lengden for de ulike undersøkelsesklassene. Sprengningskostnader omfatter sprengning, utlasting og rigg.



Statens vegvesens håndbok 021 "Vegtunneler" fra 2002 gir krav til nøyaktighet i kostnads-overslag i de ulike planleggingsfasene. En konsekvens vil være økt omfang og systematisk gjennomføring av grunnundersøkelser samt økte krav til vurdering av resultatene. Kravet til nøyaktighet av kostnadsoverslag er bestemmende for hvilken kunnskap om grunnforholdene som er nødvendig på ulike stadier av planleggingen. Tabell 2.2 viser en oversikt over omtrentlig fordeling av forundersøkelser i de ulike planfasene. De mest omfattende undersøkelsene foretas i reguleringsplanfasen, der også kostnadsoverslaget har nøyaktighet på  $\pm 10\%$ . Det krever at undersøkelsesomfanget bør være større enn det som har vært vanlig i tidligere praksis.

**Tabell 2.2:** Omtrentlig fordeling av forundersøkelser i de ulike planleggingsfasene.

PROSJEKTFASE	FORUNDERSØKELSER	
	Krav til nøyaktighet på kostnadsoverslaget	Fordeling
Idé	?	1 – 5 %
Tidlig oversiktsplan	$\pm 30 - 40\%$ ?	7 – 15 %
Oversiktsplan	$\pm 25\%$	15 – 35 %
Reguleringsplan	$\pm 10\%$	25 – 60 %
Byggeplan, anbud	$\pm 10\%$	10 – 30 %

Rapporten diskuterer også variasjoner og kompleksitet i berggrunnen og usikkerheter forbundet med å påvise dette. Konklusjonen er at selv omfattende grunnundersøkelser ikke kan avdekke alle forhold i berggrunnen, og at det derfor alltid er mulighet for at uventede forhold påtreffes. Publikasjonen har ikke med detaljerte vurderinger av potensialet til de nye forundersøkelsesmetodene (se Publikasjon nr. 102) i forhold til omfang og hva som er mulig å få ut av informasjon. Det understrekes imidlertid at godt planlagte undersøkelser og riktig tolkning av fremkomne resultater øker kjennskapen til berggrunnens kvalitet og reduserer sjansen for å treffe på uventete forhold.

## 2.3 Forundersøkelsesmetoder



Aktiviteter (se tabell 1.1):

A1	Lunnertunnelen
A6	Krokskogen
A8	Jong–Asker
A12	Øysand–Thamshavn
A13	Radar interferometri

**Publikasjon nr. 102:**  
**Delprosjekt A, Forundersøkelser – Sluttrapport**  
(J. S. Rønning).

Målet med Delprosjekt A var å gjennomføre forundersøkelser med metoder som er kjente men lite brukt ved tunnelprosjektering, evaluere nytten av disse metodene for fremtidige prosjekt og sammenligne dem med tradisjonelle metoder. Norges geologiske undersøkelser (NGU) ved Jan Steinar Rønning har hatt ansvaret for dette arbeidet. Delprosjektet har dels gått inn i planlagte og igangsatte utviklingsprosjekter ved NGU, som også disponerer det aktuelle utstyret. Resultatene er beskrevet og vurdert i Publikasjon nr. 102 og i en rekke rapporter underveis i prosjektet (se side 22).

Terrenget over Lunnertunnelen ble valgt ut som hovedområdet for utprøvinger av flere typer av undersøkelsesmetoder (se kapittel 1.3). Parallele utprøvinger gir oss realistiske svar på hvilken metode som gir de beste prognosene på svakhetssoner og vannmengder. I tillegg var det mulig å vurdere resultatene mot erfaringer fra tunneldrivingen.

Utprøvingene ble videreført på Jong–Asker-anlegget som startet opp i 2002, og der data fra anlegget er tilgjengelig for sammenligninger. For å teste metodene i andre bergarter enn Oslofeltets, ble også målinger utført i forbindelse med OPS-anlegget Øysand–Thamshavn i Sør-Trøndelag, der byggingen av tunneler på E39 startet opp i 2003. Disse dataene vil danne grunnlaget for en ny doktorgradsoppgave ved NGU. Delprosjektet har også utnyttet data fra NGUs helikoptermålinger over Krokskogen som tidligere er utført i forbindelse med forundersøkelser for Ringeriksbanen.

Utprøving av nye metoder har gitt mye verdifull informasjon og erfaringer som gir større valgfrihet med hensyn til metoder, teknikker og utstyr ved planlegging og prosjektering av tunneler. Ved hjelp av relativt enkelt og rimelig utstyr kan vi få ut detaljerte opplysninger om svakhetssoner i berggrunnen og om vannmengder. Arbeidet er i innledningsfasen, og flere av metodene vil kreve videre utprøvinger i andre typer geologiske miljø. Innsamling av erfaringer med disse metodene er avgjørende for en best mulig dokumentasjon og utnyttelse for bruk i tunnelprosjektet. Andre geofysiske

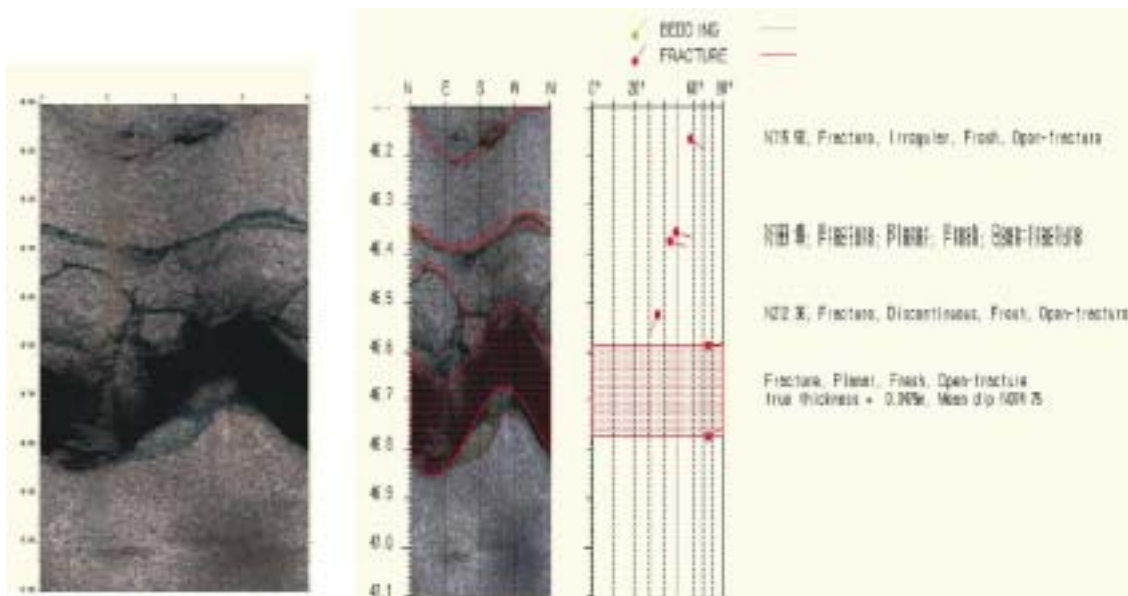
metoder som seismisk tomografi og georadar har lignende potensiale til å bestemme forløp av svakhetssoner, denne teknologien finnes og er klar til bruk.

I det følgende gis en kortfattet beskrivelse av noen av metodene som har vært testet.

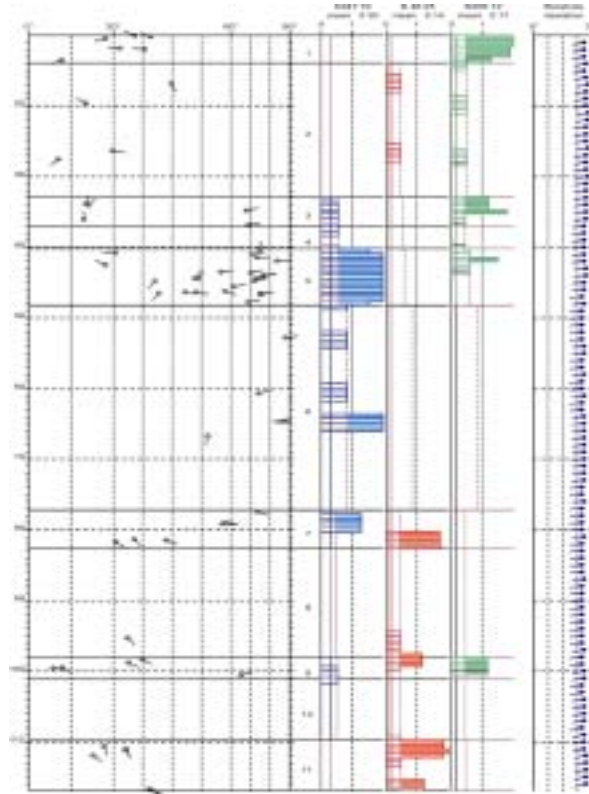
### Inspeksjon og logging av borhull

Inspeksjonsteknikkene som er prøvd ut gir informasjon om grad av oppsprekking og vannmengder i utvalgte soner der det er aktuelt med detaljundersøkelser. Metodene er prøvd ut ved flere tunnelanlegg i forbindelse med prosjektet. Resultatene er også sammenlignet med tidligere undersøkelser utført i NGUs forsøksfelt i Sunnfjord, utgitt i prosjektets rapportserie. En kombinasjon av metodene som beskrives kan være aktuelle som gode alternativer til tradisjonell kjerneboring og Lugeon-målinger.

Optisk televiewer (OPTV) gir informasjon om geologien i grove borehull. Utstyret er et videokamera som senkes ned i et borhull, kameraet filmer mot et hyperbolsk speil og gir et optisk bilde av borehullsveggen i 360°. NGU anskaffet dette utstyret etter utprøvinger med gode resultater i forprosjektet. Metoden krever en borehullsdiameter på 70–160 mm, og kan brukes både i tørre og i vannfylte borehull såfremt vannet er klart. OPTV presenterer et detaljert bilde av borehullsveggen (se figur 2.2.a) der geologiske strukturer som sprekker, bergartsgrenser og ganger fremstår tydelig. Fra registreringer i innebygde instrumenter kan retning, fall og tykkelse av strukturer som skjærer borehullsveggen bestemmes. Sprekker og strukturer kan deretter presenteres i diagrammer som stereogram og sprekkelogg (se figur 2.2.b). Åpne sprekker og soner med intens oppsprekning og med stort lekkasjepotensiale ble påvist med denne metoden, blant annet over Lunner-tunnelen.



**Figur 2.2.a:** Eksempel på opptak av optisk televiewer som viser et 360° bilde av borehullsveggen. Strøk, fall og tykkelse på sprekkenes kan beregnes direkte.



**Figur 2.2.b:** Sprekkelogg fra borhull med plott av individuelle sprekker til venstre, der nest opptreden av ulike definerte sprekkegrupper. Til høyre vises borehullsforløpet.

I borehull er det mulig å logge ulike geofysiske parametre som gir indirekte informasjon om vann i borehull. En enkelt sonde senket ned i borehullet kan logge temperatur, vannets elektriske ledningsevne og naturlig gammastråling. Endringer i vanntemperatur og ledningsevne kan skyldes innstrømming av vann med andre egenskaper og tyde på åpne sprekker. For eksempel kan lavere ledningsevne tyde på innstrømming av overflatevann. Endringer i naturlig gammastråling antyder vekslning i berggrunnsgeologien på grunn av ulike mineralogiske sammensetninger.

Bergets resistivitet eller tilsynelatende elektrisk motstand kan måles ved hjelp av en sonde senket ned i et vannfylt borehull. Metoden registrerer soner med ledende mineraler, men det er også vist korrelasjoner mellom målt lav resistivitet og påviste sprekkesoner.

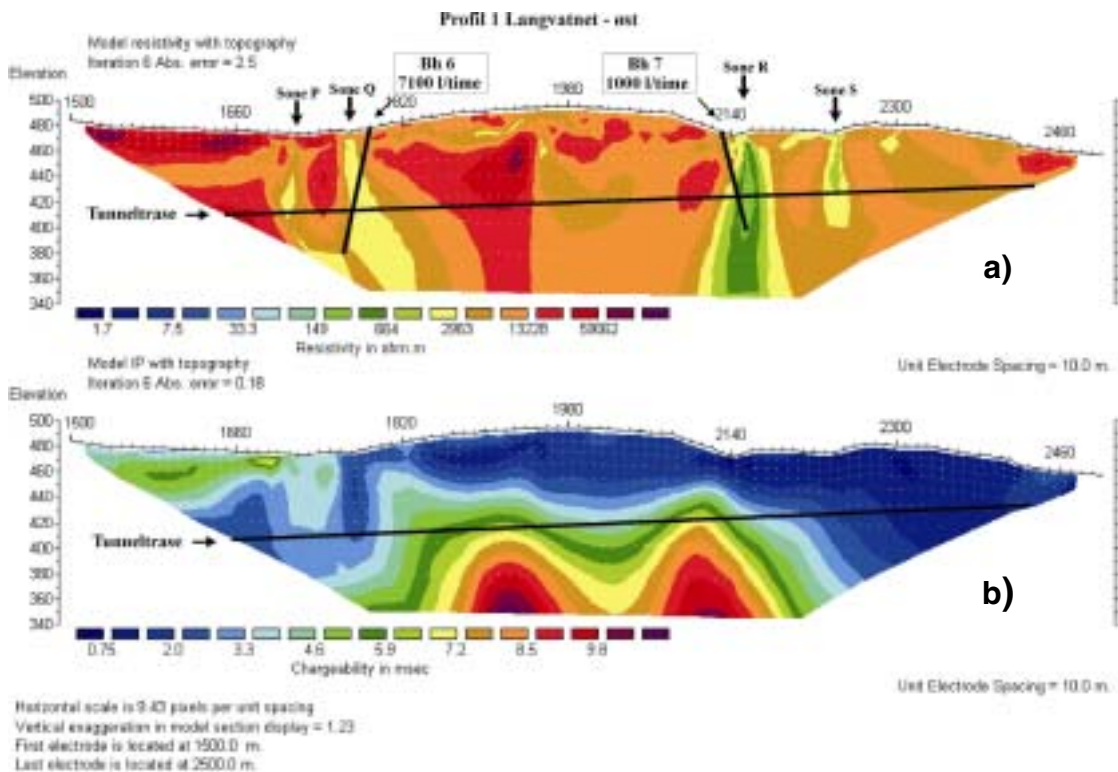
Prøvepumping i kombinasjon med strømningsmålinger i borehull gir informasjon om hvor i borehullet vannet strømmer inn og total vanngiverevne/lekkasjepotensiale for borehullet. Metoden synes å være et godt og sikkert alternativ til vanntapsmålinger.

### **Todimensjonal (2D) resistivitet**

Utprøvinger av resistivitetmålinger (elektrisk motstandsmåling) i dette prosjektet har gitt svært interessante resultater, og er den metoden som har vist best potensiale med hensyn til å kartlegge forløp av svakhetssoner mot dypet. Metoden har i lang tid vært vanlig i malmløst. Bedret programvare, datateknikk og tolkningsmetoder har gjort det mulig å vurdere metoden også for undersøkelse av bergkvalitet i forbindelse med tunnelprosjektering.

Målingene utføres ved hjelp av kabler lagt ut på bakken og med elektroder koblet til. Ved å variere avstanden mellom elektrodene kartlegges tilsynelatende resistivitet i berget ned til ca. 120 meters dyp, men tolkningene av de dypeste partiene kan være usikre. Målingene inverteres og gir et bilde (2D profil) av variasjonen i resistivitet mot dypet (figur 2.3.a). Soner med lavere resistivitet indikerer svakhetssoner/soner med økt oppsprekking, eventuelt kan disse sonene skyldes konsentrasjoner av sulfider, oksyder eller leirminerale. Resultatene tolkes i sammenheng med andre data fra berggrunnen og svakhetssoner kartlagt på overflaten og ved borehullslogging.

Erfaringene viser at svakhetssoner påvises entydig der resistiviteten er over 5000 ohmm, og der vannfylte svakhetssoner gir god kontrast. Et eksempel er Gualia (Lunnertunnelen) der resultatene var svært gode ved at de påviste svakhetssonene samsvarte med svakhetssoner kartlagt på overflaten, i borehull og under tunneldrivingen. Samtidig viste områder med høy resistivitet gode bergforhold og driveforhold. En generelt lavere resistivitet i bergartene over Jong–Asker-tunnelene (< 5000 ohmm) og påvirkninger fra tekniske anlegg i dette området ga ikke like klar informasjon.



**Figur 2.3:**

a) Eksempel på 2D resistivitetsprofil over en strekning av Lunnertunnelen. Fargekoder representerer bergartenes ledningsevne, som kan tolkes som fasthet. Grønne soner representerer lavere resistivitet og antyder svakhetssoner, som senere ble påvist ved borehullslogging og under tunneldrivingen.

b) Eksempel på IP-profil over samme strekning som i a) men uten korrelerbare resultater.



2D resistivitet er en svært lovende metode. Der forholdene ligger til rette for det, gir den verdifull informasjon om dybde og retning av svakhetssoner og mulig vannførende soner, noe som ikke er mulig med de tradisjonelle metodene. Det gir grunnlag for best mulig plassering av borhull/brønner for videre inspeksjon. Problemet er å vite på forhånd om metoden kan forventes å gi gode resultater i et gitt område. For å finne ut mer om det kreves dokumentasjon fra flere utprøvinger ved ulike geologiske forhold og i ulike bergartstyper.

### **Indusert polarisasjon (IP)**

Målinger av IP ble utført på flere av lokalitetene med tanke på å avdekke svakhetssoner i berggrunnen. I teorien skulle det være mulig å skille leirfylte soner fra rene vannsoner med denne metoden. Målingene utføres samtidig med 2D resistivitesmålinger og med det samme utstyret. I løpet av dette prosjektet har det ikke fremkommet entydige, brukbare resultater (se eksempel i figur 2.3.b).

### **Helikoptermålinger**

Geofysiske målinger som magnetiske, elektromagnetiske (VLF-EM) og radiometriske målinger utføres samtidig fra helikopter for å avdekke regionale strukturer, også i områder som er dekket av løsmasser. Geofysiske anomalier fremkommer på et lineamentskart. Magnetiske målinger er basert på innhold av magnetitt i berggrunnen, og magnetiske lineamenter kan tolkes som bergartsgrenser, forkastninger eller svakhetssoner. VLF-EM viser elektrisk ledende strukturer i bakken, eller vannfylte/leirfylte svakhetssoner. Radiometriske lineamenter antyder bergartsgrenser, men ofte har tolkningene vist seg å være usikre. De samlede resultatene er verdifulle i en tidlig fase av planleggingen og kan fungere som et grunnlag for verifisering av tolkningene og oppfølging med bakke- og borehullsmålinger.

Målinger fra helikopter er relativt ressurskrevende, og har vært utført bare et par ganger i forbindelse med tunnelprosjektering. Hensikten med å ta med metoden i prosjektet var å verifisere at metoden fungerer og er et effektivt redskap til kartlegging av store områder på kort tid. Helikoptermålinger var opprinnelig planlagt over Romeriksporten men det ble skrinlagt. NGUs målinger som tidligere var utført over Grua (Lunnertunnelen) er utgitt i vår rapportserie (Rapport nr. 5). I tillegg har NGU måleresultater fra Krokskogen som del av forundersøkelser for Ringeriksbanen, et prosjekt som ikke er påbegynt. Bakkemålinger og borhullsmålinger på Krokskogen er utført for å bekrefte anomalier fra helikoptermålingene, og dette arbeidet var vellykket ved at registrerte anomalier ble verifisert (Rapport nr. 35: Dalsegg et al. 2003).

**Rapport nr. 5: Vurdering av geofysiske anomalier ved Langvatnet med bruk av helikoptermålinger** (Beard 2001).

Magnetiske og VLF-målinger på bakkenivå er også utprøvd på flere lokaliteter i prosjektet, se rapportoversikten på neste side. Erfaringer med utprøvinger av ulike metoder på de samme lokaliteter har vist at en metode som 2D resistivitet har gitt langt mer nøyaktige data, og mer omfattende informasjon enn de nevnte magnetiske/elektromagnetiske bakkemålingene.

## Rapporter fra nye forundersøkellesmetoder

**Rapport nr. 7: Geofysiske målinger ved Langvatnet** (Rønning og Dalsegg 2001)  
Testing av nye teknikker. På bakkenivå: 2D resistivitet, VLF og magnetometri. I borhull: resistivitet, optisk televiewer.

**Rapport nr. 8: Inspeksjon og logging av brønner over Romeriksporten. Vurdering av lekkasjepotensial og stabilitet** (Elvebakk og Rønning 2001).  
Sammenstilling av data fra optisk televiewer og andre geofysiske logger fra 4 borhull.

**Rapport nr. 9: Borehullsinspeksjon. En utprøving og sammenligning av optisk og akustisk televiewer** (Elvebakk og Rønning 2001).  
Resultater fra ett borhull ved Lutvann. Tre instrumenter: optv (2 stk.) og aktv.

**Rapport nr. 10: Borehullslogging og strukturgeologiske studier, Gualia** (Elvebakk et al. 2001).  
Optv i borhull. Prøvepumping i kombinasjon med strømningsmåling. Sammenligner fjellkvalitet og vanngiverevne

**Rapport nr. 12: Forundersøkelser tunneler. Nyere undersøkelsesmetoder** (Rønning 2002).  
En oppsummering av de nye metodene for forundersøkelser, presentert på NIFs kursdager i 2002.

**Rapport nr. 20: Hydraulisk testing av borehull i fjell i Gualia, Lunner kommune** (Storrø et al. 2002).  
Resultater fra pumpetester på fire brønner over traseen til Lunnertunnelen. Også optv og geofysiske loggemetoder. Pumpetestene viser lekkasjepotensialet.

**Rapport nr. 21: Geofysiske målinger, Langvatnet – øst, Lunner, Oppland** (Dalsegg og Rønning 2003).  
Fortsettelse av tidligere utførte undersøkelser som 2D-resistivitet og IP-målinger under endrede betingelser.

**Rapport nr. 25: Borehullslogging i fjellbrønn, Folvåg, Sunnfjord. En verifisering av lineamentsmodell mht. oppsprekking og vanngiverevne** (Elvebakk et al. 2003).

**Rapport nr. 26: Borehullslogging i fjellbrønn, Holmedal, Sunnfjord. Verifisering av hydrogeologisk modell mht. bergspenning, oppsprekking og strømnings-retning** (Elvebakk og Rønning 2003).  
Rapport nr. 25 og 26: Resultater fra logging av ca. 100 m dype fjellbrønner etablert av NGU i Sogn og Fjordane. Brønnene er boret gjennom lineamenter for å kartlegge oppsprekking og vanninnhold.

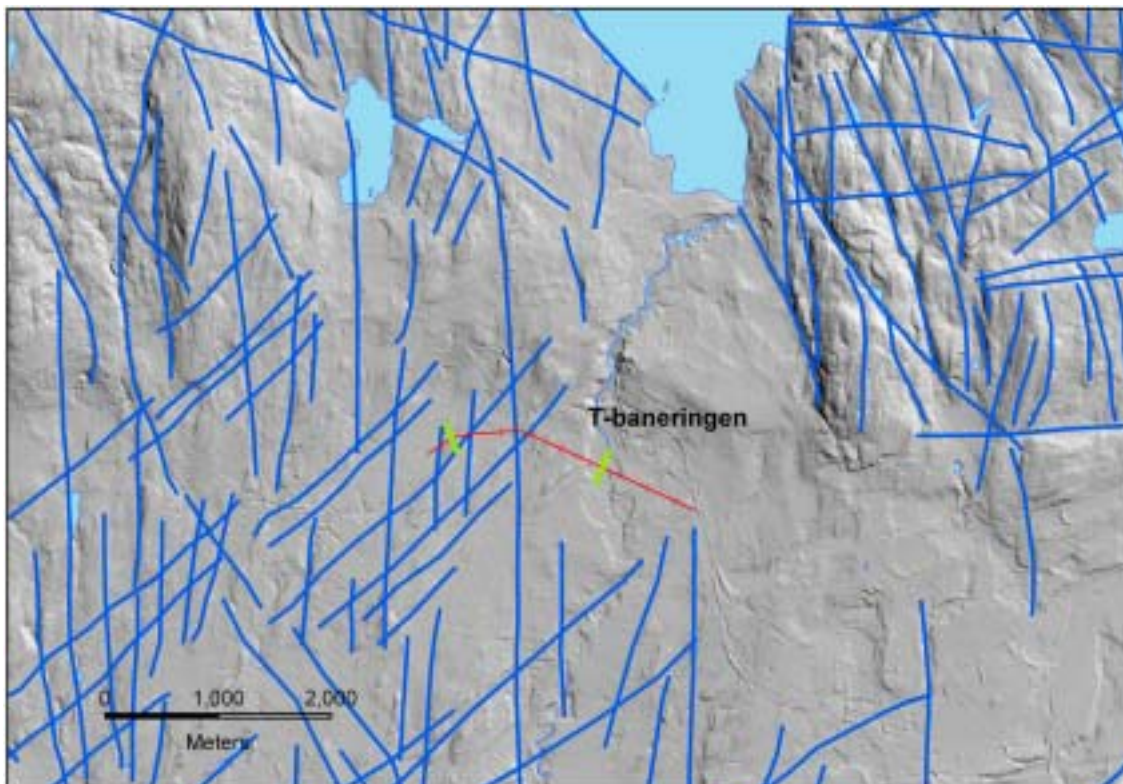
**Rapport nr. 34: Geofysiske bakkemålinger og borehullslogging, Jong–Asker, Asker og Bærum** (Dalsegg et al. 2004).

**Rapport nr. 35: Geofysiske bakkemålinger og borehullslogging, Krokskogen, Ringerike og Hole** (Dalsegg et al. 2004).

**Rapport nr. 36: Geofysiske bakkemålinger og borehullslogging, E39, Skaun, Sør-Trøndelag** (Dalsegg et al. 2004).

## Digital høydemodell

NGU har lenge benyttet digitale høydemodeller for å tolke regionale geologiske forhold. I prosjektet ble det besluttet å teste denne teknikken med hensyn til detaljert kartlegging av lineamenter i tettbygd område (Rapport nr. 24). Utprøvingen hadde utgangspunkt i T-baneringstunnelen, som går i et tettbygd område med begrensede muligheter til å kartlegge strukturer på overflaten. Et datasett ble stilt til rådighet av Oslo kommune og ble brukt til å fremstille en høydemodell som grunnlag for tolkning av lineamenter i berggrunnen i Oslo-området.



**Figur 2.4:** Digitaliserte lineamenter ved T-baneringen. Rød linje viser traseen for T-baneringen. Tunnelen er mellom de grønne markeringene.

Kartbildet som ble fremstilt fra området over T-baneringstunnelen (figur 2.4) viser tydelige lineamenter representert ved sprekkesoner og forkastninger, blant annet kryssende soner som viste seg å få stor betydning for tunneldrivingen (se kapittel 2.6 og 4.3).

**Rapport nr. 24: Bruk av digitale høydedata i strukturgeologisk analyse: Eksempel fra Oslo kommune.** (Nordgulen & Dehls 2003).

Digitale høydedata kan brukes direkte sammen med andre digitale datasett som flybilder, satellittbilder, kart osv. Modellen gir blant annet mulighet til å fremstille kart med skyggerelieff som fremhever og synliggjør terrengformer, og på grunn av god oppløsning vil alle typer lineamenter kartlegges. Denne teknikken har vist seg godt egnet til å få frem informasjon om berggrunnen i tettbygde strøk, i områder med mye infrastruktur eller i områder med tett vegetasjon, og gir verdifull informasjon på et tidlig stadium av planleggingen.



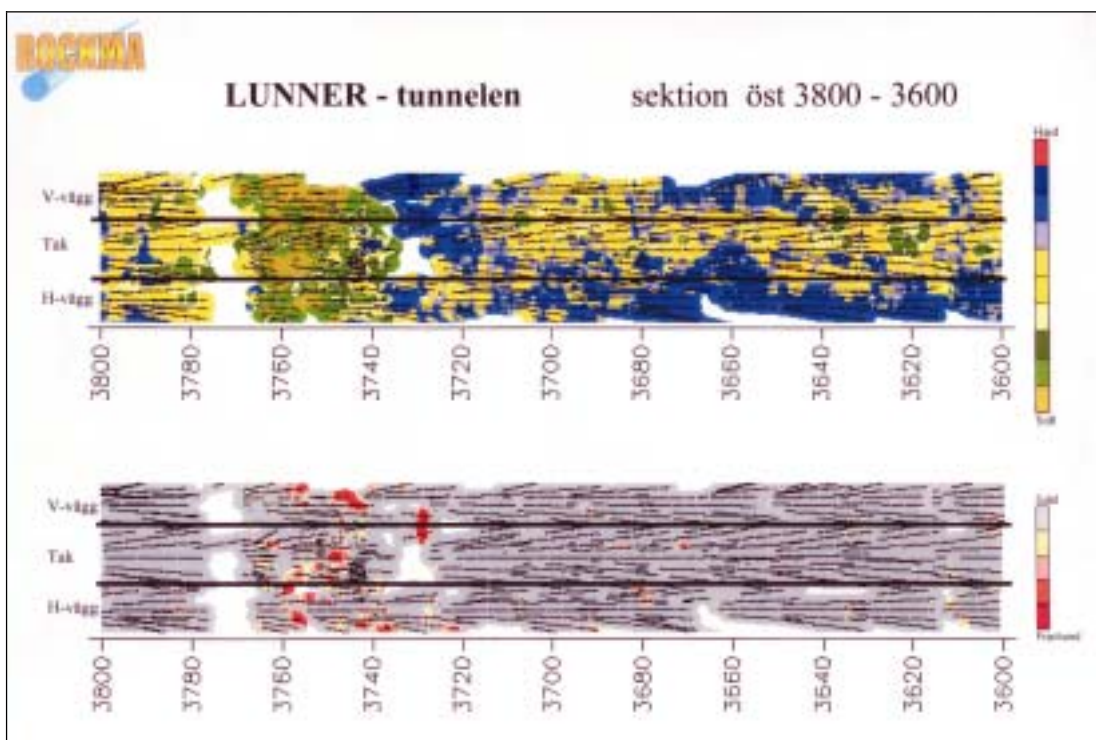
### Radar interferometri

Ny satellittbasert metode for overvåking av setninger, som et mulig alternativ eller supplement til nivelleringsmålinger. Ved å konstruere en digital terrengmodell ved hjelp av gjentatte målinger kan vertikale bevegelser ned til 1 mm pr. år bestemmes med denne metoden. NGU har igangsatt et program for utprøvinger i Norge, og prosjektet har i 2003 delfinansiert prosessering av data i Oslo-området. Det finnes satellittdata fra perioden 1992–2000, som vil fungere som referansepunkter for senere registreringer, som kommer i gang med nye satellitter. Ved analysene legges det inn en lineær modell for beskrivelse av endringer. Resultater så langt indikerer at metoden er lite egnet til detaljoppfølging av et anlegg, men kan påvise setninger i et område over tid, for eksempel før, under og etter en tunnel bygges. Foreløpige data påviser blant annet innsynkning i områder over Romeriksporten både før og etter start av tunnelbyggingen.

**Rapport nr. 37: Analyse av INSAR-data over Romeriksporten** (Dehls & Nordgulen 2003).

### Automatisk logging av data fra borhull (MWD)

MWD (measuring while drilling) er utstyr montert på borryggen for automatisk registrering av ulike parametre som borsynk, matetrykk, rotasjonstrykk og -hastighet, hammertrykk, vanntrykk, vannmengde og tid under boring. Dataene tolkes ved hjelp av programmer som tilpasses den enkelte tunnelrigg. Tolkingsprogrammene gir et visuelt bilde av bergmassens relative oppsprekning og vekslende hardhet. Resultatene kan videre kalibreres mot hardhetstester, oppsprekningstall og målte innlekkasjer avhengig av hva som ønskes av informasjon fra det enkelte anlegg.



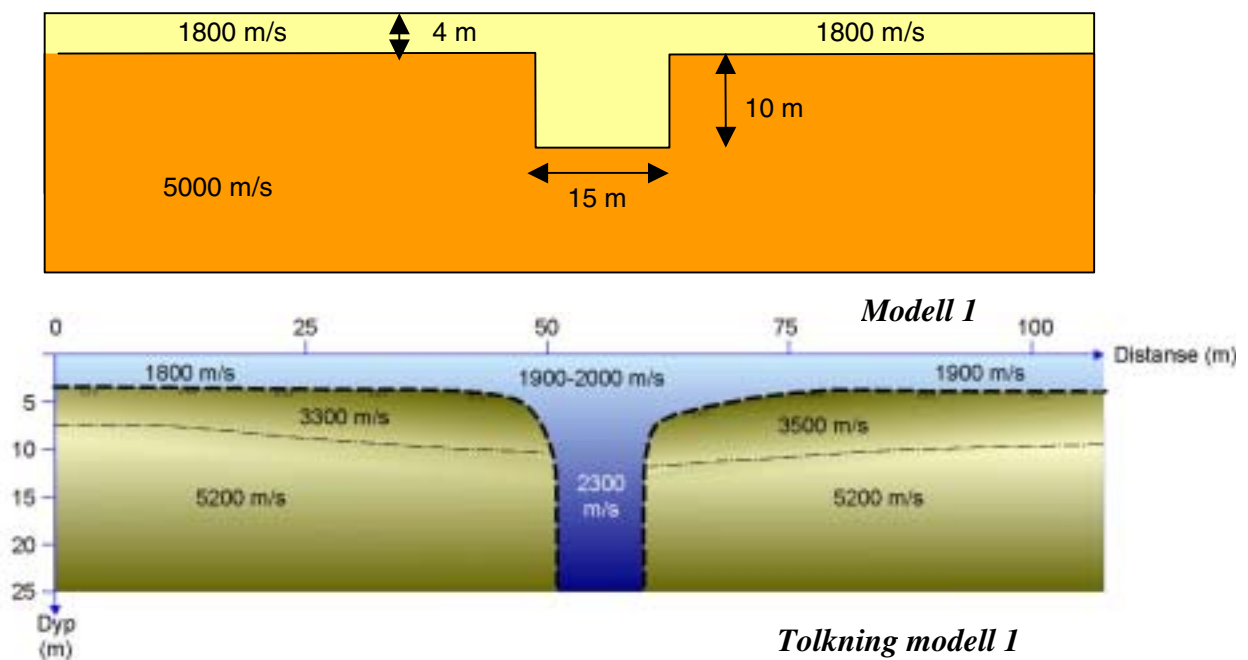
**Figur 2.5:** Eksempel på fremstilling av MWD-registreringer i borehull fra Lunnertunnelen, vekslende hardhet (øverst) og sprekkefrekvens (nederst) etter en forhåndsdefinert skala.

MWD-registreringer har ikke vært eget tema i prosjektet, men omfattende registreringer fant sted i T-baneringtunnelen, og disse dataene er presentert som del av rapporter fra tunnelen (Rapport nr. 33: Løset & Kveldsvik 2003 og Rapport nr. 16: Boge et al. 2002). I deler av Lunnertunnelen (NCC-siden) foregikk MWD-registreringer systematisk (figur 2.5). Prosjektet finansierte registreringer i øvrige deler av tunnelen. Disse data skal tolkes og sammenstilles som en del av doktorgradsoppgaven fra prosjektet.

Erfaringene med metoden er så langt gode, tross noen praktiske problemer i innkjøringsfasen og tilgjengeligheten av programvare. Metoden synes å ha et godt potensiale som supplement til ingeniørgeologisk kartlegging i tunnel, blant annet ved å sikre dokumentasjon fra anlegget. MWD vil være spesielt verdifull til hjelp på borrhigen, et tolkningsprogram på borrhigen vil gi daglige, oppdaterte erfaringer med pågående prosjekt og gi muligheten for systematisk oppfølging av tunneldriften.

## 2.4 Refraksjonsseismisk modellering

Utgangspunktet for aktiviteten (A11, se tabell 1.1) var å undersøke muligheten for å få ut mer data fra refraksjonsseismiske målinger, forbedre tolkningsmetodene for om mulig å finne bunnen av svakhetssoner samt å avsløre kabelheng. Refraksjonsseismikk er en viktig og velprøvd forundersøkelsesmetode innen tunnelprosjektering, spesielt i forbindelse med undersjøiske tunneler. En stadig forbedring av programvaren forenkler metodene og gir muligheter for å få ut mer data. Arbeidet er utført av Harald Westerdahl, Norges Geotekniske Institutt (NGI) og Ole Chr. Pedersen, Geomap.



**Figur 2.6:** Øverst: modell brukt ved beregning av syntetiske data. Nederst: resultat av tolkning.

I rapporten (Rapport nr. 32) beskrives hvordan seismisk modellering brukes til å lage og analysere syntetiske refraksjonsseismiske data. For å teste metoden ble det utført en blindtest der syntetisk genererte data ble gitt til en erfaren tolker. Det viste seg at tolkeren blant annet la inn en vertikal svakhetsone under en depresjon i modellen selv om den ikke finnes (figur 2.6). Tolkning ved kabelheng resulterer i en modell med løsmasser oppover fjellsiden. Tolkingsresultatet er ikke i overensstemmelse med modellen fordi mangel på entydighet i dataene gir rom for tolkninger. Blindtesten viser at tolkningene som presenteres er konservativ, og det foreslås en presentasjon av flere tolkningsalternativer der situasjonen tilsier at det kan være viktig. I forbindelse med skarpe depresjoner i fjell kan man for eksempel presentere to forskjellige tolkninger, de to ytterpunktene.

Modellen viser blant annet at beregning av riktig dyp fra dataene er mulig bare der det finnes refraksjonspunkter fra bunnen av depresjonen, og at dybder over 5 meter vil tolkes som en depresjon med en vertikal svakhetsone under. For å bestemme en svakhetsones utstrekning mot dypet med høyeste grad av sikkerhet bør man utføre seismisk tomografi mellom to vertikale hull, eller et skråhull og overflaten. Det gir et todimensjonalt profil med fordeling av seismisk hastighet/bergkvalitet.

**Rapport nr. 32: Seismisk modellering. Modellering av seismiske data over løsmassefylte depresjoner, svakhetssoner og ved kabelheng (Westerdahl 2003).**

Tolkningen av refraksjonsseismiske data baseres på gitte forutsetninger om de geologiske forholdene, for eksempel at den seismiske hastigheten øker kontinuerlig mot dypet. I de fleste tilfellene stemmer det med de eksisterende forhold fordi metoden brukes i områder der de geologiske forholdene tilfredsstiller forutsetningene, f.eks. løsmasser over fjell. Forsøkene med seismisk modellering viser at det ikke er lett å gi sikre tolkninger, og det er vanlig å legge mer vekt på tolkningene enn realitetene skulle tilsi.

## 2.5 Doktorgradsoppgave

En doktor-ingeniøroppgave ble satt i gang med bakgrunn i temaene fra prosjektet:

*”Regional- og strukturgeologiske forholds betydning for vannlekkasjer i tunnelanlegg”.*

Kristin Hilde Holmøy er ansatt som stipendiat ved Institutt for geologi og bergteknikk, Norges teknisk–naturvitenskapelige universitet (NTNU) i Trondheim for perioden 2002–2005. Stillingen er lønnet i henhold til en avtale mellom Statens vegvesen og NTNU.

Målet med oppgaven er å komme fram til anbefalte prosedyrer og retningslinjer som vil gi sikrere prognoser med hensyn til vannlekkasje for fremtidige tunnelanlegg. Spesielt tas det sikte på å utrede sammenhengen mellom regionalgeologi/strukturgeologi og vannlekkasjer.

Arbeidet er innledet med systematisering av data om forundersøkelser og injeksjon fra fullførte, godt dokumenterte anlegg. Det gjelder i første rekke anleggene som har vært studert i prosjektet: som Lunnertunnelen, T-baneringen og Jong–Asker-tunnelene. I tillegg studeres bl.a. Romeriksporten og Frøyatunnelen. Oppgaven blir blant annet å vurdere ulike undersøkelsesmetoder og finne hvilke som gir best forutsigbarhet med

hensyn til vannlekkasjer under gitte forhold. For Lunnertunnelen er det lagt ned et spesielt stort arbeid i forundersøkelsesdelen, og en lang rekke metoder er utprøvd i regi av prosjektet. For å oppnå optimal utnyttelse av dataene er det nødvendig med en evaluering basert på sammenligninger med data fra tunnelen. MWD-registreringene fra Lunnertunnelen og fra Jong–Asker-tunnelene sammenstilles også i forbindelse med oppgaven. Flere ingeniørgeologiske prosjektoppgaver og diplomoppgaver ved NTNU fra disse tunnelene understøtter studiet.

Doktorgradsarbeidet vil representere en videreføring av prosjektet og vil være et prøveprosjekt for teknologien som er utviklet i prosjektet.

**Rapport nr. 15: Oppsummering av utførte undersøkelser og prognose for innlekkasje ved Grualiatunnelen (Holmøy 2002).**

Oppsummering av en rekke tradisjonelle og nye metoder for forundersøkelser over en gitt strekning av tunnelen som ikke var ferdig drevet, med en prognose for innlekkasje basert på disse metodene.

## 2.6 Erfaringer fra fullførte anlegg

Aktiviteter (se tabell 1.1):

- A1: Lunnertunnelen
- A3: T-baneringen
- A4: Frøyatunnelen
- A5: Romeriksporten

### Lunnertunnelen

En sammenstilling av data fra ingeniørgeologiske forundersøkelser, lav-resistivitetssoner og erfaringer fra tunneldrivingen i østre del av Lunnertunnelen er gjort i forbindelse med Publikasjon nr. 102 (Rønning 2003). Ifølge oversikten har resistivitetmålinger fungert godt for påvisning av svakhetssoner, metoden viste både forløp av soner som var kartlagt på overflaten og ikke-kartlagte soner med betydning for tunneldriften. Resistivitetsdataene kan for en stor del karakterisere sonene. Samtidig viste partier med høy resistivitet gode driftsforhold.

### T-baneringen

Norges Geotekniske Institutt (NGI) har foretatt en sammenstilling og evaluering av injeksjonsdata og lekkasjedata fra tunnelen samt data fra forundersøkelser og tunnelkartlegging (Rapport nr. 33). Forundersøkelsene omfatter refraksjonsseismikk, boringer og laboratorieforsøk rettet mot poretrykk og setningsskader. Resultater sammenlignes også med erfaringer fra Tåsentunnelen like ved.

Tunnelen var valgt ut som hovedobjekt for den innledende delen av Delprosjekt C: «Tetteteknikk» med oppfølging av forinjeksjonsarbeidet i tunnelen (se kapittel 4). Under tunneldrivingen ble det foretatt kontinuerlig ingeniørgeologisk kartlegging på stoff. Det finnes data fra lekkasjemålinger og fra logging under salve- og injeksjonsboring (MWD-rigg).

NGU foretok i forbindelse med prosjektet en analyse av digitale høydedata i området (se figur 2.4) i etterkant av tunnelbyggingen (Rapport nr. 24: Nordgulen og Dehls 2003). I det tettbygde området med få fjellblotninger påviste denne metoden en markert forkastningssone som fikk stor betydning for stabilitet og injeksjon. Ved bruk i planleggingsfasen ville denne sonen kunne blitt videre karakterisert ved kjerneboring eller borehullslogging.

I tunnelen ble stabilitetsforholdene beskrevet med Q-systemet. Sammenligninger viser dårlig samsvar mellom estimert Q-fordeling fra refraksjonsseismikk og kartlagte Q-verdier i tunnelen. De estimerte verdiene viste jevnt over en bedre bergmassekvalitet.

I rapporten er injeksjonsdataene vurdert med tanke på om de kan brukes under forundersøkelsene for å prognosere injeksjonsbehov. Konklusjonene er at tidligere erfaringer synes å gi de beste prognosene for injeksjon i tunneler i kambro-silurbergarter i Oslo-regionen supplert med mer detaljerte geologiske data, blant annet fordi eruptivganger har stor betydning for vannlekkasjer og injeksjonsomfang.

I tunnelen ble MWD-programmet (se kapittel 2.3) benyttet til logging av hardhet, oppsprekking og vannforhold, og disse dataene er sammenlignet med data fra tunnelkartlegging og lekkasjemålinger. Resultatene viser god korrelasjon mellom logget hardhet og bergarter kartlagt på stoff. For oppsprekking og vannforhold er sammenhengen dårligere. En større nøyaktighet kunne vært oppnådd ved et mindre loggintervall men dette var ikke mulig på grunn av for liten lagringskapasitet for data. Liten variasjon i oppsprekking og bergmassekvalitet gjennom tunnelen kan også være årsak til at det var vanskelig å registrere variasjoner.

**Rapport nr. 33: T-bane Ullevål stadion – Nydalen: forundersøkelser og injeksjon**  
(Løset & Kveldsvik 2003).

### Frøyatunnelen

Undersjøisk tunnel mellom Hitra og Frøya i Sør-Trøndelag som åpnet i år 2000. Anlegget er valgt ut som eksempelstudium fordi det var svært vellykket og er spesielt vel-dokumentert fra forundersøkelser til ferdig tunnel. I forbindelse med prosjektet har NGI utarbeidet en rapport (Rapport nr. 11) som tar utgangspunkt i dokumentasjon fra injeksjonsarbeidet og Q-verdier, supplert med forundersøkelsesdata fra NGU.

Rapporten gir en sammenligning mellom Q-verdi, injeksjonsmengde, vannlekkasje og geologi. Det ble ikke påvist noen klar korrelasjon mellom dem; kun ved å tillemppe Q-verdien kan en få en viss sammenheng med injeksjonsmengder. Tillempingen gjelder innføring av parameteren lekkasje i borhull, som medfører at denne type vurdering kun kan brukes under selve tunneldrivingen.

**Rapport nr. 11: Frøyatunnelen. Vurderinger av injeksjon i forhold til Q-parametre**  
(Bhasin & Kveldsvik 2002).

### **Romeriksporten**

Romeriksporten var i utgangspunktet med som egen aktivitet siden tunnelen og vannlekkasjene som oppstod der var det som satte hele prosjektet i gang. Planen var å utføre helikoptermålinger for å finne ut om svakhetssonene som ble avdekket under tunneldrivingen, kan observeres med geofysiske målinger fra helikopter, samt å kunne sammenligne denne type geofysiske målinger fra flere ulike lokaliteter. Det ble gjort for å vurdere egnetheten til helikoptermålinger. Imidlertid ble det besluttet å overføre midler og undersøkelser til andre aktiviteter og lokaliteter (bl.a. Lunnertunnelen og Krokskogen) der det var antatt at mer relevant informasjon kunne fås ut.

Det foregår en kontinuerlig overvåking av grunnvannet over tunnelen, og mye data er tilgjengelig. Resultater fra inspeksjon av borhull som ble utført i etablerte brønner over Romeriksporten, er beskrevet i rapport nr. 8 og 9 (Elvebakk og Rønning 2001 a og b). En sammenstilling av injeksjons- og forundersøkelsesdata fra tunnelen er planlagt utført innenfor doktorgradsstudiet.

## 3 DELPROSJEKT B, SAMSPILL MED OMGIVELSENE

### 3.1 Innledning

Hovedrapport:

**Publikasjon nr. 103:**

Undersøkelser og krav til innlekkasje for å ivareta ytre miljø

Deltagere:

**NGI**

**Jordforsk**

**NINA**

**Norconsult**

**Statens vegvesen**

Et utgangspunkt for etablering av FoU-prosjektet var lekkasjeproblemer og skader på naturmiljøet og bebyggelsen som oppstod i forbindelse med byggingen av Romeriksporten, en økt interesse for grunnvannsproblematikk og hvordan skadeeffekter på omgivelsene kan unngås. Arbeidet i Delprosjekt B «Samspill med omgivelsene» var konsentrert om å utarbeide en veileder som behandler undersøkelsesmetodikk og spørsmål som går på et tunnelanleggs mulige og akseptable konsekvenser for det ytre miljøet.

Forprosjektet i 1999 var svært omfattende og resulterte i forslag som favnet et bredt spekter av aktiviteter som ikke tildelt midler (se vedlegg II). Kjell Karlsrud, Norges Geotekniske Institutt (NGI) utarbeidet en ny prosjektbeskrivelse basert på temaene i forprosjektet og de nye rammene som ble gitt, og har hatt ansvaret for sluttrapporten fra delprosjektet: Publikasjon nr 103. Arbeidet i delprosjektet kom i gang i 2001 og ble innledet med utarbeidelse av en statusrapport: Rapport nr. 14.

Temaene i statusrapporten var følgende:

- Klassifisering av sårbarhet for vegetasjon
- Klassifisering av sårbarhet for vannkilder
- Sammenheng mellom lekkasjer og endring i grunnvannsstand
- Poretrykksendringer og skader i urbanområder
- Grovklassifisering av akseptkriterier for tunnellekkasjer.

**Rapport nr. 14: Konsekvenser av tunnellekkasjer for det ytre miljø. Statusrapport 2001 (Karlsrud et al. 2002).**

Arbeidsgruppen har sett på hvordan tunneldreneringer påvirker vegetasjon, vannkilder, grunnvann og poretrykk, for å kunne klassifisere områder med tanke på sårbarhet og vurdere følger av en grunnvannssenkning i et gitt område. Statusrapporten var utgangspunkt for videre utredninger og utarbeidelse av prosedyrer for bestemmelse av lekkasjekrav. I Publikasjon nr. 103 (se kapittel 3.4) oppsummeres dette arbeidet. Rapporten gir utbyggere et redskap ved planlegging og prosjektering av tunneler. Resultatene gir et bedre grunnlag for beslutninger om trasévalg og fastsettelse av lekkasjekrav som er fornuftige i forhold til hva et område kan tåle og hva som kan aksepteres.



## 3.2 Klassifisering av sårbarhet for naturmiljø

Aktiviteter (tabell 1.1):

B1: Klassifisering av sårbarhet for vegetasjon

B2: Klassifisering av sårbarhet for vannkilder

I dette arbeidet er det samlet ny, tverrfaglig kunnskap om sammenhengen mellom hydrogeologi og skader på vegetasjon og vannkilder ved tunnellekkasjer. Arbeidet er utført av Lars Erikstad og Egil Bendiksen, Norsk institutt for naturforskning (NINA), og Petter Snilsberg, Jordforsk.

For å klassifisere sårbarhet ved tunnellekkasjer behøves kunnskap om sammenhengen mellom løsmasser, berggrunn og det lokale nedbørfeltet. Sårbarhet bør kunne si noe om sannsynlighet og omfang av skadeeffekter som kan oppstå i naturmiljø som følge av tunneldrenering og nye grunnvannsforhold. Aktivitetene ble innledet med en oppsummering av status for kjent kunnskap og nyere forskningsresultater innen temaene. I det videre arbeidet ble aktivitetene slått sammen til et felles prosjekt med en innsamling av erfaringer fra varige skader på naturmiljø over utvalgte tunneler med dokumenterte lekkasjer og endringer i grunnvannsstanden. Det er ikke tidligere utført en slik systematisk dokumentasjon av skader på naturmiljø i forbindelse med tunnelbygging. I rapport nr. 40 gis resultatene fra feltregistrering av vegetasjon. I Publikasjon nr. 103 er resultatene presentert i forbindelse med utarbeidelse av lekkasjekrav i tunneler.



**Figur 3.1:**

Rikmyrsparti ved Sanddøladalen, Grong i Nord-Trøndelag. Rikheten vises på bildet som et stort mangfold av næringskrevende karplanter (foto: Dag Svalastog).



Tunnelene i undersøkelsen av vegetasjonens tilstand (Rapport nr. 40) omfatter jernbane-, veg-, vann- og kloakktunneler. Utvalget ble gjort på bakgrunn av variasjon i berggrunnsgeologi, løsmassegeologi, nedbørfeltets størrelse og kjente tunnellekkasjer. Det ble laget et eget felt- og registreringsskjema som tar vare på relevante opplysninger med hensyn til sårbarhet. Registreringene er et utgangspunkt for å finne hvilke parametre som kan brukes som indikatorer for å påvise grunnvannssenkning. Det finnes imidlertid lite data fra undersøkelser av vegetasjon eller hydrogeologi før tunnelen ble bygget, slik at det er vanskelig å påvise endringer. Det er derfor registrert tilstand på vegetasjonstyper og forhold ved vegetasjonen som kan tyde på uttørking, som tørkesprekker og skjeve trær.

Undersøkelsene påviste mindre skade på vegetasjonen enn forventet. For de fleste lokaliteter har det ikke vært mulig å spore entydige visuelle endringer på vegetasjon. Det kan skyldes flere faktorer: at det faktisk er lite skader i forbindelse med tunnellekkasjer, at skader er blitt leget raskt, at skader ikke er påvisbare på grunn av lite grunnlagsmateriale eller skadene må dokumenteres på et mer detaljert skalanivå. Resultatene er viktig for en generell økning av kunnskap om skadenivå ved tunnellekkasje, og vil kunne danne grunnlag for hypoteser for senere testing i forbindelse med mer detaljerte studier. Slike registreringer må ses i sammenheng med tidligere inngrep. For eksempel kan tidligere vegbygging eller grøfting av myrområder ha forårsaket større endringer i grunnvannssystemet.

**Rapport nr. 40: Befaring av eksisterende tunneler med lekkasjer. Vurdering av betydning for naturmiljø** (Bendiksen et al. 2004).

### 3.3 Modelleringer

Tre ulike modeller er prøvd ut i løpet av prosjektet, med mål å finne realistiske svar på effekter på grunnvannsnivå ved ulik grad av innlekkasje til tunneler:

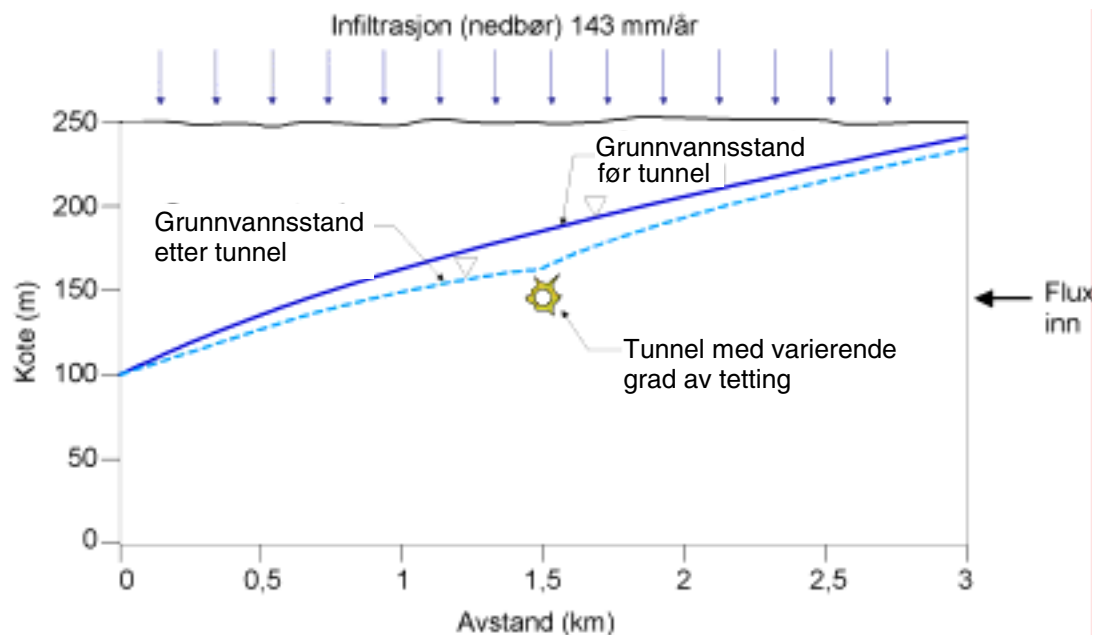
- Kontinuum-modeller (porøs media modell)
- Sprekkemodell
- Modellering av lokale bassenger.

Forståelsen for hvordan lekkasjer i en tunnel påvirker grunnvannssystemet er viktig for å kunne forutsi konsekvensene og utarbeide tettestrategier for tunnelen. Modelleringer gir muligheten for å belyse konsekvenser i god tid før tunnelen bygges. Behovet for slike modelleringer må ses i sammenheng med hvor stor skade tunnelanlegget kan påføre omgivelsene.

#### **Kontinuum-modeller**

En del enkle modelleringsforsøk er utført for å beregne sammenhengen mellom endringer i grunnvannsstand og poretrykk, bergmassens konduktivitet, tunneldybde, naturlig infiltrasjon og effekten av tetting. Arbeidet er utført av Kevin Tuttle, Norconsult. I statusrapporten (Rapport nr. 14) er det vist flere eksempler på analytiske beregningsmetoder for lekkasje i tunnel og estimering av grunnvannssenkning. Rapport nr. 39 gir resultater fra ulike modellforsøk.

**Rapport nr. 39: Analytiske modeller – beregning av lekkasjerater, grunnvannssenkning og influensområde** (Tuttle 2004).



**Figur 3.2:** 2D-modell for simulering av effekten av tunnellekkasje i en homogen berggrunn (Publikasjon nr. 103).

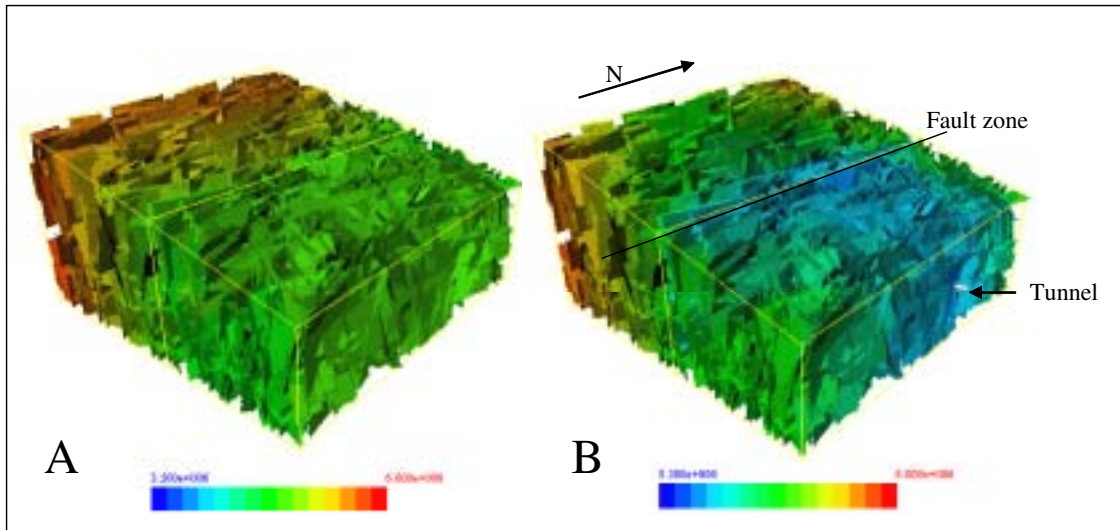
I forsøkene er det brukt en enkel 2D porøs-media modell der berggrunnen behandles som en porøs, homogen masse (figur 3.2). Denne modelltypen er velprøvd og anses å gi et godt nok resultat ved vurdering av gjennomsnittlige strømningssegenskaper. Beregningene kan gi et estimat av grunnvannssenkningen over en tunnel og viser sammenhengen mellom de ulike parametrene. Forsøkene i dette prosjektet har ikke nådd fram til en enhetlig modell. Det vil kreve flere utprøvinger med ulike parametre for bedre å forstå samspeillet mellom konduktiviteten i berggrunnen og grunnvannssenkning.

### Sprekkemodell

For å få en mer realistisk tilnærming til en hydrogeologisk strømningsmodell har NGI etablert en 3D sprekkemodell i programmet NAPSAC for simulering av grunnvannsstrømning i sprekker i bergmasse. Modellforsøkene er utført av Vidar Kveldevik, Fabrice Cuisiat og Elin Skurtveit.

Hensikten med modellforsøket var å undersøke de hydrogeologiske forholdene før og etter bygging av Lunnertunnelen. I modellen er data lagt inn fra et område på 550 x 550 m langs Lunnertunnelen rett vest for Langvatnet og inneholder kontaktsonen mellom hornfels og syenitt. Data fra forundersøkelsene ble brukt til å sette opp modellen, der storskala-sprekker og forkastninger er lagt inn. Småskala-strukturer som er karakterisert fra borehullsregistreringer er benyttet til å generere et sprekkennettverk.

Modelleringene gir et tredimensjonalt bilde av sprekkesystemet og vanntrykket før og etter en tunnel bygges (figur 3.3). Forsøkene viser blant annet det innbyrdes forholdet mellom store konduktive forkastninger (rask senkning) og bakgrunnssprekker (tregere respons) ved grunnvannssenkning. Det er også utført modelleringsforsøk der effekten av tetting, det vil si redusert permeabilitet, er tatt med. De viser endringene i grunnvannstrykket og strømningsbildet ved ulike lekkasjerater.



**Figur 3.3:** Eksempel på resultat fra simulering i NAPSAC-modellen; utgangssituasjon til venstre, tunnel til høyre. Fargeskalaen representerer fordelingen av vanntrykket (Pa). Vannet antas å strømme fra høyt trykk (rødt) mot lavt trykk (blått). Det laveste vanntrykket kan observeres i en sone rundt forkastningen og i området med lav fjelloverdekning over tunnelen.

**Rapport nr. 27: Prediction of leakage into the Lunner tunnel based on discrete fracture flow models** (Cuisiat et al. 2003).

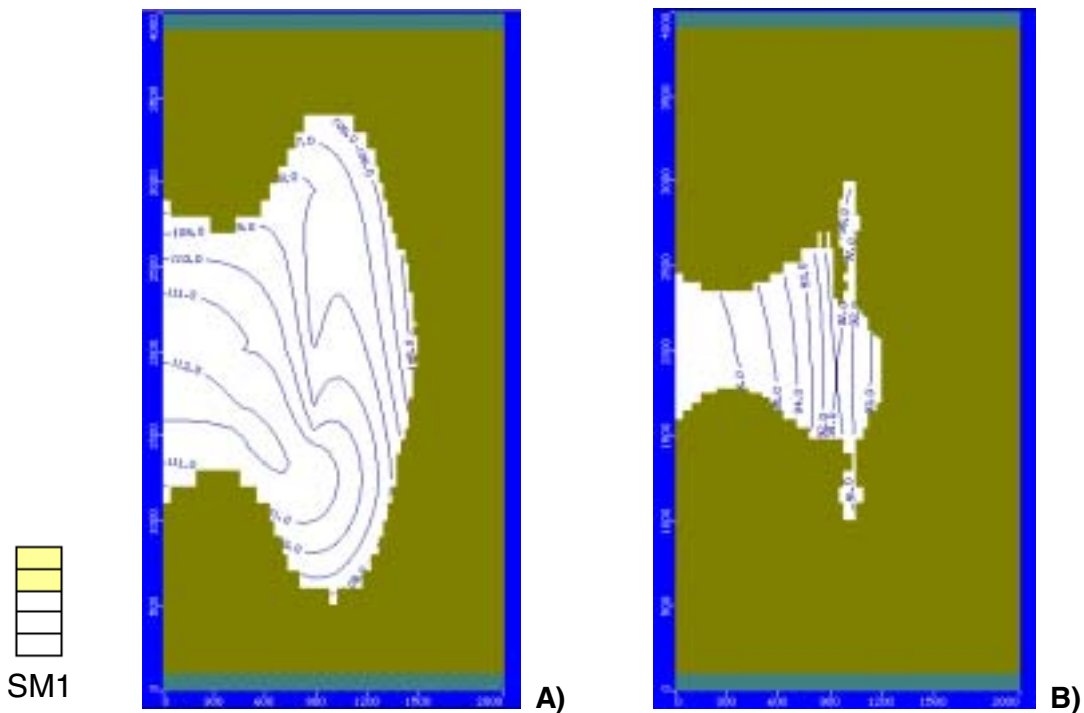
Begrensninger ved modellen er blant annet regnekapasiteten som gjør at modellområdet må avgrensnes. Arbeidet har gitt et nyttig bidrag til å vurdere hvor egnet et avansert 3D-program er til å modellere grunnvannsstrømning i oppsprukket berg. Resultatene så langt er lovende, men for å få en modell som tas i bruk kreves videre analyser. Modellen er mer nøyaktig og har høyere presisjon enn en porøs-media modell, men den krever mer bakgrunnsdata, og etableringstiden er lengre.

### Modellering av lokale bassenger

I prosjektet er det også utført innledende studier av påvirkning av en tunnel på lokale løsmassebassenger ved bruk av en porøs-media modell. Forsøkene er utført ved Jordforsk av Petter Snilsberg og Helen French.

Jordforsk satte i gang utprøving av modelleringsprogrammet for å studere effekter av tunneldrenering på et sårbart område og betydningen av løsmassetypene og -mektigheten over tunnelen. Modellen er bygd opp med en tunnel plassert under en myr i en forsøkningsområde med varierende typer og mektighet av sedimentene over fjell og med variabel hydraulisk ledningsevne. Realistiske forsøk vil kreve god kartlegging av den lokale hydrogeologien og løsmassetypene. I modellen testes betydningen av tykkelse og lag-sammensetningen av sedimentene, spesielt viktig er tilstedeværelse av leirlag, posisjonen til grunnvannsspeilet i terrenget rundt forsøkningsområdet og effekten av en tørkeperiode.

Konklusjonen så langt er at et høytliggende grunnvannsspeil minsker faren for ugunstig drenering i området forutsatt at bergsprekker drenerer mot forsenkningen. Tettende leirlag har god effekt på å opprettholde grunnvannsstanden, også i tørkeperioder. Der berget har lavere ledningsevne enn overliggende løsmasser fungerer berget som en barriere mot drenering. Drenering i løsmasser med lavere ledningsevne enn fjell vil være større med økt mektighet av sedimentene, men bare så lenge porøsiteten i løsmassene er større enn i fjellet.



**Figur 3.4:** Eksempel på simulering, med en før (A) og etter (B) tunnelsituasjon for et landskap med lavt omliggende grunnvannsspeil og 10 m mektighet av sand (SM1 viser: gul – sandlag, hvit – fjell). Tunnelen er definert som et dreneringsrør i nord–sør retning. Areal med mettet (hvit) og umettet (grønn) sone i overflaten definerer utbredelsen av myrområdet. Sandjord gir rask drenering med effekt for grunnvannsnivået.

**Rapport nr. 38: Modellverktøy for analyse av virkningen av tunneler på sårbare naturtyper** (Snilsberg og French 2004).

### 3.4 Samspill med omgivelsene - sluttrapport



**Publikasjon nr. 103:**  
**Undersøkelser og krav til innlekkasje for å ivareta ytre miljø**  
(K. Karlsrud, L. Erikstad og P. Snilsberg).

Resultatene fra Delprosjekt B er innarbeidet i sluttrapporten: Publikasjon nr. 103, som behandler prosedyrer for å fastlegge krav til innlekkasje til tunnelanlegg ut fra hensyn til mulige skader på naturmiljø og bebyggelse omkring anlegget. Rapporten er utarbeidet av Kjell Karlsrud, NGI, Lars Erikstad, NINA og Petter Snilsberg, Jordforsk.

Målsettingen med arbeidet i Delprosjekt B var å gi retningslinjer for etablering av krav som bør settes til innlekkasje til tunnelanlegg ut fra mulige konsekvenser for det ytre miljøet. Det gjelder primært konsekvenser knyttet til:

- Hva som kan bli effektene av en gitt lekkasje for naturmiljøet; vegetasjon, grunnvann og åpne vannkilder
- Hva som kan forventes av poretrykksendringer og potensielle setningsskader på bebyggelse ved en gitt lekkasje.

Arbeidet er enestående i sitt slag. Det finnes ingen tilsvarende systematisk gjennomgang av konsekvensvurderinger for grunnvann, vannkilder, vegetasjon og setningsproblematikk i forbindelse med tunnelbygging.

#### **Vurderinger av tunnellekkasjer og mulig påvirkning på grunnvann**

Det gis en innføring i det hydrologiske kretsløpet med beskrivelse av vannbalansen og grunnvannsstrømning i naturen og konsekvenser ved inngrep som skaper ubalanse i systemet. Ulike modelleringsprogram er prøvd ut (se kapittel 3.3) for beregning av innlekkasje til en tunnel og mulig påvirkning på grunnvannsstand og poretrykk i omgivelsene samt effekter av tetting. Publikasjonen vurderer potensialet og begrensningene for de ulike modellene som er prøvd ut i prosjektet og sammenligner erfaringstall fra utvalgte anlegg.

### Bestemmelse av lekkasjekrav i naturområder

Sammenhengen mellom hydrogeologien i et nedbørfelt og vegetasjonen er avgjørende ved klassifisering av sårbarheten for et naturområde. Sårbare naturområder er først og fremst åpent vann og vegetasjonstyper som er avhengige av direkte kontakt med grunnvannet. Sårbarhet for vannkilder er blant annet knyttet til endringer av vannkjemi og forsuring som følge av grunnvannssenkning.

I et forslag til metode for sårbarhetsanalyse lokaliseres sårbare, våte naturtyper i forsenkninger ved hjelp av digitale kart. Informasjonen kan videre kombineres med struktur-geologiske kart. Forsenkninger med regionale sprekker viser hvor risikoen for skader ved en grunnvannssenkning er høyest. Risikoen for påvirkning av naturmiljø ved en grunnvannssenkning sammenholdes med verdien til området.

Vegetasjonskartlegging utført i prosjektet viser at det er vanskelig å påvise skader etter dokumenterte lekkasjer (kapittel 3.2). Eventuelle endringer naturmiljøet har heller ikke vært mulig å påvise på grunn av manglende kartlegging av før-situasjonen. En klassifisering av endringer som skade avhenger av verdivurderinger for det aktuelle området. I prosjektet er det utledet et system for verdisetting av berørte områder som et grunnlag for konsekvensvurderinger og definisjoner av akseptkriterier. Verdisettingen kan deles inn i elementene: naturverdi, friluftsliv, betydning for nærmiljø og økonomisk verdi. Verdisettingen spesifiseres deretter (for eksempel etter en skala høy–lav) for ulike naturtyper eller naturelementer.

Proseduren for å bestemme krav til innlekkasje i naturområder kan oppsummeres slik:

- 1) Foreta en overordnet sårbarhetsanalyse av naturtyper i området. Analysen gir sammen med en grov risikoanalyse en første oversikt over sannsynligheten for naturendringer og konsekvensens omfang
- 2) En behøver en grov skalaoversikt (geografisk) og en del detaljer knyttet til små naturelementer som vannkilder. For sårbare naturtyper må det utføres detaljerte undersøkelser med hensyn til sårbarhet og risiko
- 3) Verdisette sårbare naturtyper for alle relevante utredningstemaer
- 4) Beskrive akseptert konsekvens med begrunnelse i verdisettingen
- 5) Tallfeste eller konkretisere akseptert endring i grunnvannsnivå, vannspeil og vannføring
- 6) Tallfeste akseptert innlekkasje i tunnel. Vurdere med tanke på mengde per tidsenhet for aktuell tunnellengde og punktlekkasjer. Dette punktet styres av minste aksepterte endring (mest sårbare/verdifulle naturelement langs strekningen)
- 7) Utarbeide strategi for en eventuell justering av tunneltrasé, tunneldrivingsteknikk og avbøtende tiltak med særlig oppmerksomhet på sårbare naturtyper der risiko for lekkasje er stor.

## Bestemmelse av lekkasjekrav i urbane områder

I urbane områder er det hovedsaklig viktig å vurdere fare for setningsskader som følge av poretrykksfall i løsmasser. Det er vist at potensialet for setninger og påfølgende skader på bebyggelse eller andre konstruksjoner fundamentert på eller i løsmassene er størst der løsmassene består av bløte marine leiravsetninger. Erfaringer fra tunnelanlegg under denne type løsmasser danner også mye av grunnlaget for utarbeidelse av prosedyrer for å bestemme potensialet for poretrykksreduksjon, setninger og skader sett i forhold til innlekkasje til et tunnelanlegg.

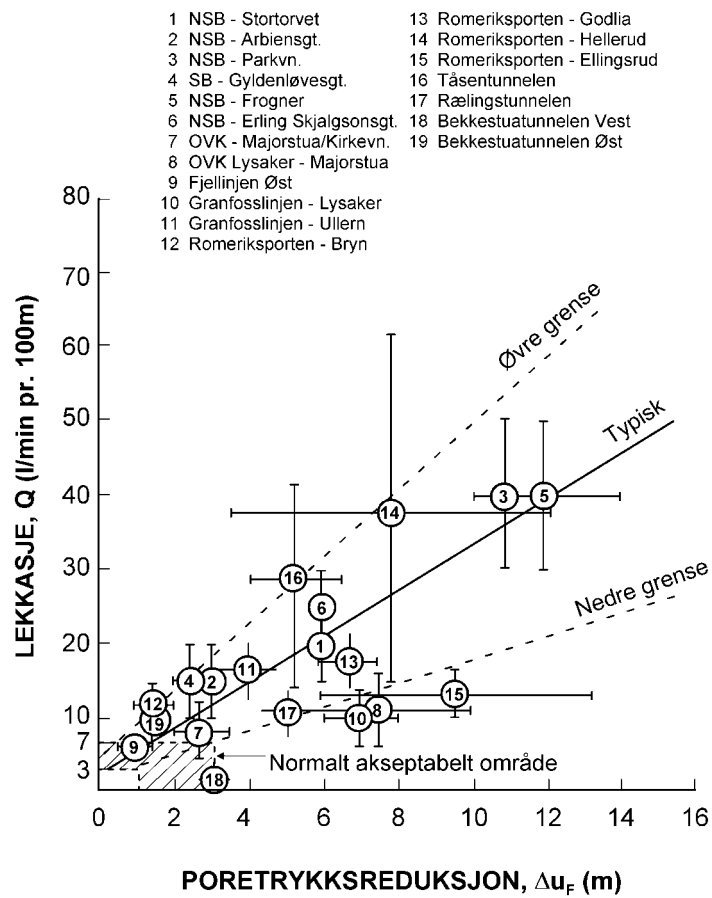
Prosedyrene for etablering av tetthetskrav i urbane områder er oppsummert ved:

- 1) Bestemme største aksepterte setninger langs tunnelen
- 2) Utarbeide løsmassekart som dekker en korridor langs tunnelen
- 3) Beregne setninger som funksjon av poretrykksfall for ulike dyprenner (løsmasseområder)
- 4) Identifisere den mest setningsutsatte bygningen i hver enkelt dyprenne og beregne største tillatte poretrykksfall ved denne bygningen
- 5) Beregne største tillatte poretrykksfall rett over tunnelen ut fra tidligere erfaringer om sammenhengen mellom poretrykksfall og avstand til tunnelen
- 6) Fastsette tetthetskrav basert på anslått akseptabel poretrykksreduksjon rett over tunnelen og erfaringsmessig sammenheng mellom innlekkasje og poretrykksfall rett over tunnelen.

Under punkt 2 og 3 inngår grunnundersøkelser og laboratorieforsøk. Alternativt eller i tillegg til prosedyren kan setninger og skadeomfang anslås basert på ulike scenarier for innlekkasje til tunnelen, avhengig av tettheomfanget. En slik gjennomgang kan gi et godt grunnlag for å vurdere tettekostnader mot skadekostnader.

Erfaringsdata fra leirfylte dyprenner i Oslo-området tilsier at et poretrykksfall på 1–3 mm som regel vil gi små setninger (inntil noen få cm) og liten fare for vesentlig skade. Ut fra erfaringsdata vil en poretrykksreduksjon ved fjell på 1–3 mm gi en akseptabel lekkasje på 3–7 l/min/100 m (figur 3.5).

Publikasjonens siste del oppsummerer krav (ifølge håndbok 021 Vegtunneler) til vurderinger og godkjenning i de ulike planfasene.



**Figur 3.5:** Sammenheng mellom lekkasje og poretrykksreduksjon ved fjell rett over tunnelanlegg. Et karakteristisk område er foreslått som grunnlag for valg av tetthetskrav.



## 4 DELPROSJEKT C: TETTETEKNIKK

### 4.1 Innledning

Hovedrapport:

**Publikasjon nr. 104:**  
Berginjeksjon i praksis

Deltagere:

**NVK**  
**NGI**  
**SINTEF**  
**Aquateam**  
**Norconsult**  
**Noteby**  
**Geovita**  
**Jernbaneverket**  
**Statens vegvesen**

Arbeidet i delprosjekt C: Tetteteknikk er basert på prosjektforslagene som ble utarbeidet i forprosjektet (se vedlegg II). Det ble satt sammen en delprosjektgruppe bestående av fagfolk med lang og relevant erfaring fra tunneldriving og tettarbeid i tunnel. Målet for arbeidet var å forbedre og videreføre konvensjonell teknikk, og å utforske nye metoder for å kunne lage en felles plattform for metoder og utførelse.

Tetteteknikk er definert som de metoder som kan brukes for å oppnå kravet til innlekkasje. Metodevalg baseres på gitte krav og tilgjengelig kunnskap om grunnforholdene. Det er enighet om at tetting med forinjeksjon har vært og er den mest effektive metoden for tetting av tunneler. I prosjektet er det også testet og innhentet erfaringer fra andre typer tettemetoder. Sluttrapporten fra delprosjekt C: Publikasjon nr. 104 er imidlertid konsentrert om praktisk utførelse av forinjeksjon.

Delprosjektet har blant annet sett på injeksjonsstrategi for vanskelige områder, dokumentasjon av materialeegenskaper for injeksjonssementer og naturlige tetteprosesser. Hoveddelen av arbeidet i første del av prosjektperioden var praktiske utprøvinger på anlegget for T-baneringen og rapportering av arbeidet. Arbeidet på T-baneringen foregikk ved en egen samarbeidsavtale mellom anlegget og prosjektet. Delprosjektgruppen har også fungert som rådgivningsgruppe for både T-baneringstunnelen og Jong–Asker-tunnelene. Gruppen har vært tverrfaglig sammensatt med omfattende kompetanse og gitt viktige bidrag med hensyn til kontraktsutforming og gjennomføring av tunnelprosjektene.

Arbeidet i delprosjektet har dokumentert metoder for forinjisering av tunnel som oppfyller krav til tetthet med stor grad av nøyaktighet. Det er videre samlet inn viktig dokumentasjon og erfaringsdata fra injeksjonsarbeidet ved en rekke ferdige anlegg. Resultatene er gitt i rapportserien og i Publikasjon nr. 104 (kapittel 4.6).

## 4.2 Testing av injeksjonssementer

Aktiviteter (tabell 1.1):

**C1: Injeksjonssementer**  
**C8: Laboratorietesting**

### 4.2.1 Testrigg

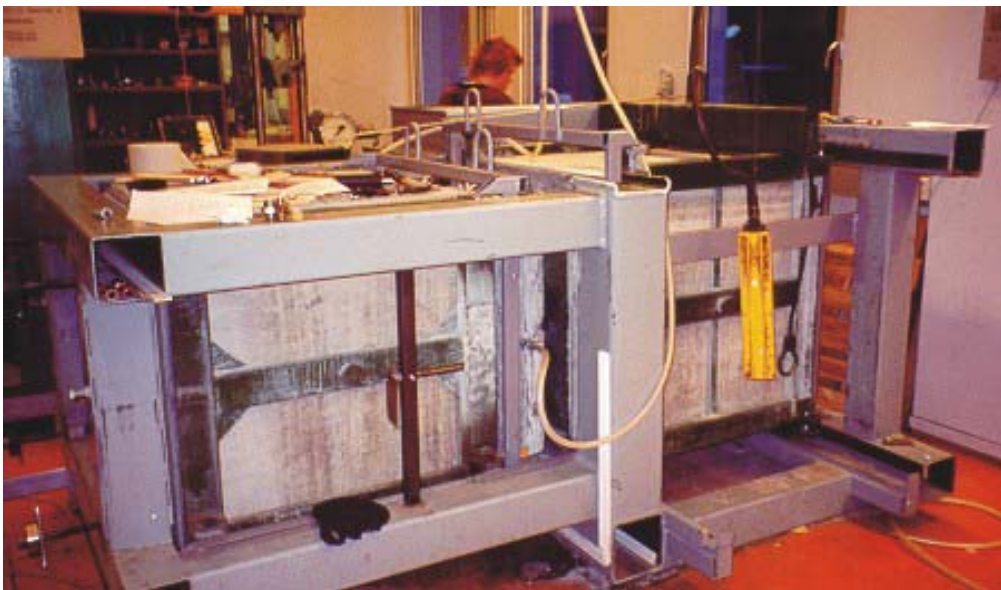
Ved SINTEF Bygg og miljø, avdeling Berg og geoteknikk er det bygd opp en testrigg for å teste inntrengnings- og materialegenskaper til sementer under kontrollerte betingelser. Dette arbeidet ble ledet av Anders Beitnes. Målet har vært å utvikle utstyr og finne hvilke parametre som virker inn på inntrengningsevne og styrke for om mulig å forbedre materialer og bearbeidingsprosedyrer av sementen. Standardiserte prøvningsmetoder for å teste og klassifisere sementtyper til injeksjon finnes ikke i dag.

Selve modellen er bygd opp av to glassplater klemt mot hverandre. I den ene platen er det frest ut spor som simulerer sprekker (0,05–0,14 mm). Platene spennes mellom to betongklosser som gir en ønsket innspenning nært opp til naturlig bergspenning. Instrumenter registrerer inntrengning av sement (figur 4.1). Byggingen av modellen har vært komplisert med mye prøving og feiling med hensyn til innspenningen, glassplatene og instrumenteringen. Et forsøk i 2002 ga svar på noen spørsmål, blant annet at omrøringshastigheten hadde en effekt på inntrengningsevnen. En ny versjon av riggen ble bygd opp, men i prosjektperioden er det ikke kommet reproducerbare resultater. Flere bedrifter har vist interesse, og arbeidet med riggen er kommet såpass langt at det er muligheter for videreføring.

**Rapport nr. 18: Resultatrapport fra injiseringsforsøk** (Alteren 2002)

**Rapport nr. 19: Prosedyrer for injiseringsforsøk** (Alteren og Beitnes 2002)

**Rapport nr. 28: Sluttrapport sprekkemodellen** (Nilssen og Beitnes 2003).



**Figur 4.1:** Tidlig utgave av sprekkemodellen (foto: Mona Lindstrøm).

#### 4.2.2 Laboratorietesting av sementer

Laboratorietesting av injeksjonssementer ble utført for å dokumentere materialegenskaper for ulike sementblandinger som skulle testes i testriggeren. Det ble gjennomført prøving av sementer som ble benyttet under injeksjonen i T-baneringstunnelen. Som nevnt i forrige avsnitt kunne ikke videre forsøk i sprekkeriggen utføres på grunn av forsinkelser. Resultatene fra lab-forsøkene finnes i to rapporter utarbeidet av Jan Viggo Holm og Per Heimli, NOTEBY.

**Rapport nr. 4: Laboratorietesting av mikrosementer ved T-baneringen**  
(Holm og Heimli 2001)

**Rapport nr. 6: Laboratorieprøving av injeksjonssementer** (Holm og Heimli 2001).

Ett av forsøkene var å undersøke herdeforløp og utvikling av tidligfasthet hos blandingene som ble brukt i tunnelen over en to-ukers periode, i dette tilfellet var det mest mikro-sement. I tillegg ble det foretatt målinger av inntrengningsegenskaper med NES-apparat, der injeksjonsmasse presses gjennom en tynn spalte, og vekt av inntrengt masse og tid måles. Resultatene viste at verken dette apparatet, filterpumpe eller sandkolonneforsøk var brukbare for sementene som ble brukt på anlegget. De viktigste parametrene for fasthetsutviklingen tyder på å være alder, temperaturen og renhet i omrøreren. Det er blant annet vist at:

- høye vann/semment (v/c)-forhold gir uakseptabelt lange herdetider
- bestemmelse av densitet gir en tilfredsstillende kontroll på det virkelige v/c-forholdet i blandingen
- verdier på korngradering oppgitt av produsentene viser seg ikke alltid å stemme.

Laboratorieforsøk ble utført også for å finne temperaturens betydning for injeksjonsmassens egenskaper med hensyn til herdeforløp. Resultatene tyder på at temperaturen i fjellet etter injeksjon har stor betydning, men utgangstemperaturen ser ikke ut til å ha betydning. V/c-forholdet er den faktoren som i tillegg til temperaturen under herding har størst betydning. Et v/c-forhold høyere enn 1,0 for mikrosementer gir uakseptabelt lange herdetider og bør unngås. Et fasthetsnivå på 20 kPa (tilsvarende bløt leire) ser ut til å være en hensiktsmessig tidsgrense å beskrive fasthetsegenskaper til sement, fordi fasthetsutviklingen øker markant ved denne grensen.

Selv om forsøkene ikke kunne sammenlignes med resultater fra testriggeren som planlagt, har de likevel gitt ny og viktig dokumentasjon av egenskaper til injeksjonssementer. I tillegg har forsøkene vist ulike laboratorietesters egnethet til å karakterisere injeksjonsmassen.

### 4.3 Injeksjonsstrategi

Aktiviteter (tabell 1.1):

- C2: Injeksjonsstrategi, tidsoptimalisering
- C9: Dokumentasjon

#### Injeksjonsstrategi og tidsoptimalisering

Hovedtemaene i denne aktiviteten var injeksjon under spesielle forhold, injeksjonsstrategi i vanskelige områder og tidsoptimalisering, med fokus på prosjekter som var utfordrende med hensyn til liten overdekning og/eller dårlig bergkvalitet og med strenge krav til tetthet. Oddbjørn Aasen, Norsk vandbyggningskontor (NVK) ledet arbeidet. Arbeidet ble innledet med dokumentasjon av injeksjonsarbeidene ved T-baneringstunnelen, utført av Oddbjørn Aasen, Torkild Åndal og Helen Andersson, NVK, Reidar Kjølberg, Norconsult og Knut Boge, Geovita.

Målet var å utvikle en injeksjonsmetodikk som gir en tilstrekkelig tett tunnel på en enkel måte og på kortest mulig tid under ulike geologiske forhold. Utprøvingene i T-baneringen var blant annet:

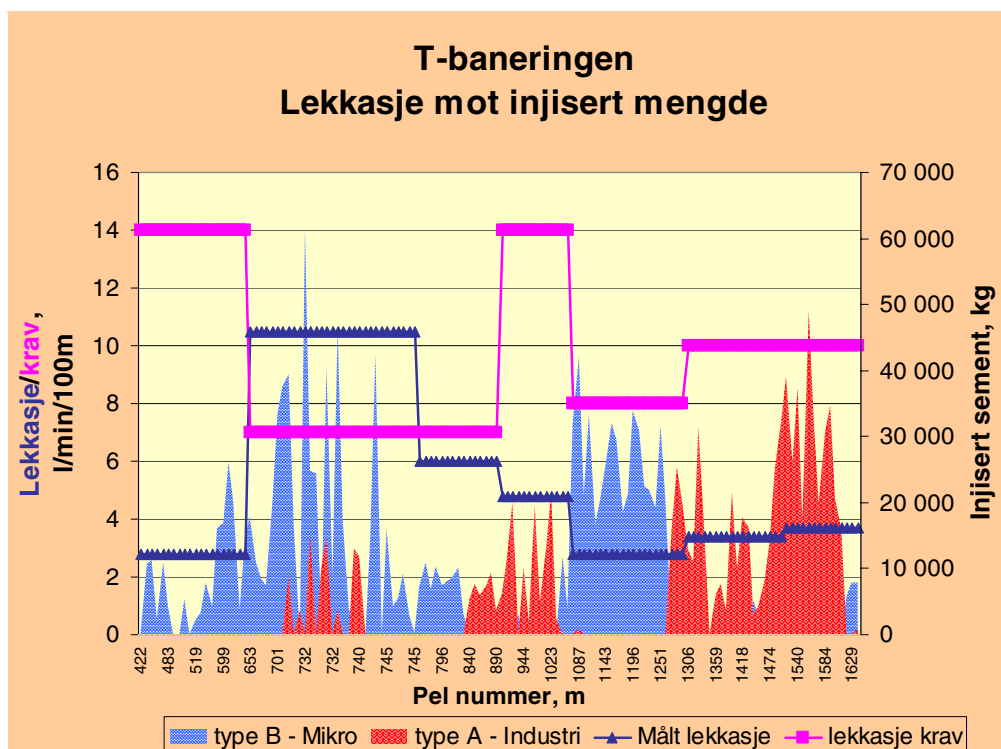
- Utprøvinger av både mikrosement og industrisement under like forhold i tunnelen, for å se på eventuelle forskjeller i tetthet. I tillegg ble det utført lab-prøvinger av de samme sementtypene. Det ble ikke vist forskjeller i tetteresultat i denne tunnelen
- Det ble gjort forsøk på tidsoptimalisering i forhold til inndrift og tetteresultat ved tilpassing av blant annet arbeidsoppgavene. Forsøk utført under forventede stabile bergforhold og ikke de strengeste tetthetskravene viste godt resultat
- Tilpasninger av injeksjonsprosedyrene. Det omfattet blant annet antall hull i skjermen, tykkelse på sementblanding, injeksjonstrykk, tilpassing til lokale forhold og vurdering av systematisk mot sporadisk injeksjon.

På grunn av fare for setninger i overliggende løsmasser var det stilt krav til tetthet på 7–14 l/min/100 m. Etter en innledende drivefase med sporadisk injeksjon og påfølgende lekkasje bak stuff ble det bestemt å utføre systematisk forinjeksjon. Injeksjonsarbeidene i tunnelen er rapportert i Rapport nr. 16. Arbeidet var vellykket ved at kravene til innlekkasje ble oppfylt med enkle og effektive metoder og materialbruk for rutinemessig injisering (figur 4.2). Gjennomsnitt av målte lekkasjer er 4,3 l/min/100 m. Innlekkasjene er noe høyere enn kravet ved en forkastningssone, ca. 50 m bred, som var spesielt problematisk med store vannlekkasjer. Forsereringen av denne sonen er også grundig dokumentert i prosjektet (Rapport nr. 3). Det er ikke meldt om setningsskader over eller nær tunnelen. Sammenlignet med Tåsentunnelen like ved var forbruket av injeksjonsmasse høyere i T-banetunnelen, men tunnelen er tettere (se Rapport nr. 33: Wold Magnussen og Kveldsvik 2003). Over Tåsentunnelen måtte det installeres permanente infiltrasjonsbrønner for å motvirke setningsskader.

Resultater og konkrete anbefalinger ble tatt med til Jong–Asker-anlegget ved oppstarten i 2002. Videre dokumentasjon av dette anlegget er tenkt utført i forbindelse med doktorgradsoppgaven (kapittel 2.5).

**Rapport nr. 3: Injeksjon av "problemsone" ved byggingen av T-baneringen (Åndal 2001)**

**Rapport nr. 16: Sluttrapport for injeksjonsarbeidene ved T-baneringen (Boge et al. 2002).**



**Figur 4.2:** Noen av resultatene fra injeksjonsarbeidet i T-baneringstunnelen. Målt innlekkasje i tunnelen er sammenlignet med kontraktsfestede krav til innlekkasje over delstrekninger. Målte lekkasjer ligger hovedsaklig godt under kravene, unntaket er i området rundt en forkastnings-sone. Både industri- og mikrosement ble injisert, men sementtypen hadde ingen betydning for tettestresultatet i denne tunnelen.

### Erfaring med injeksjonsarbeider

Erfaringer fra injeksjonsarbeidet i flere tunneler er samlet inn og sammenstilt i løpet av prosjektet. Innledningsvis ble erfaringer fra injeksjonsarbeidene i seks tunneler samlet inn: Tåsen og Svartdal i Oslo, Lundby i Göteborg, Storhaug i Stavanger, Baneheia i Kristiansand og Bragernes i Drammen (Rapport nr. 2). Samme type dokumentasjon ble utført for Lunnertunnelen (Rv 35) og Hagantunnelen (Rv 4) (Rapport nr. 23 og 31). En lignende sammenstilling vil også være verdifull for Jong–Asker-tunnelene.

Tunnelene ble valgt ut på bakgrunn av ulike bergmasseforhold og god dokumentasjon av injeksjonsstrategi og metodevalg. Innhenting av data skjedde gjennom intervjuer med representanter fra entreprenør og byggherre. Alle tunnelene hadde krav til innlekkasje på 2–20 l/min/100 m. Rapportene beskriver erfaringer med hensyn til valgte injeksjonsstrategier, utstyr, injeksjonsmidler, utførelse og resultater i forhold til tetthetskrav.

Noen av erfaringene fra injeksjonsarbeidene er at systematisk forinjeksjon som hovedstrategi for tetteinnsats er nødvendig ved strenge tetthetskrav, og fortløpende beslutninger basert på sonderboring er usikkert. Injeksjonsprogram ble justert underveis basert på erfaringer, blant annet ble tidsforbruket minimalisert. Avvik fra rutinemessig injeksjon ved for eksempel driving gjennom store svakhetssoner er beskrevet for de enkelte tunnelene.

Teknisk utstyr har gjennomgått en betydelig utvikling, som resulterer i blant annet bedre borekapasitet og bedret inntrengningsevne for sementene. Det kan brukes lavere vann/sement (v/c)-forhold, og herdetiden minsker. Bruk av høyere maksimalt injeksjonstrykk har økt inntrengningsevnen og injeksjonskapasiteten, og flere injeksjonslinjer gir økt kapasitet.

Rapportene tar for seg en del områder som har et forbedringspotensiale: antall injeksjonsmidler bør begrenses, utstyr og materialer bør videreutvikles, utarbeiding av opplegg for rutinemessig injisering som gir ønsket tetthet på én injeksjonsrunde og optimale metoder ved kryssing av knusningssoner. Det er ikke uvanlig at tetnings skjermen perforeres av sikringsbolter. Det er heller ingen gode metoder for lekkasjemålinger i tunnel.

Resultatene er sammenstilt i tabeller som samler erfaringstallene fra alle tunnelene i undersøkelsen. Tabellene gir en oversikt over: forutsetningene, organisering av injeksjonsarbeidene, boring av injeksjonsskjerm, utstyr for injeksjon, injeksjonsmiddel, prosedyre (v/c-forhold, rekkefølge av hull, og sluttrykk) og resultatet i form av lekkasjeforhold, status og vurderinger.

Oversikten utgjør verdifull dokumentasjon og har vist seg å være et godt grunnlag ved planlegging og i anbudsprosessen. Erfaringsdata ligger til grunn også ved utarbeidelse av retningslinjer og anbefalinger som er sammenfattet i Publikasjon nr. 104: Berginjeksjon i praksis (se kapittel 4.6).

**Rapport nr. 2: Injeksjon – erfaringer fra utvalgte tunnelprosjekter (Åndal et al. 2001)**

**Rapport nr. 23: Injeksjon – erfaringer fra Lunnertunnelen (Andersson 2003)**

**Rapport nr. 31: Injeksjon – erfaringer fra Hagantunnelen (Andersson 2003).**



**Figur 4.3:** Injeksjon i syenitt, Hagantunnelen (foto: Alf Kveen).



## 4.4 Naturlige tetteprosesser

En tydelig reduksjon i innlekkasje over tid er påvist i norske tunneler. Fordi det ikke er iverksatt tiltak for lekkasjereduksjon i disse tunnelene, kan det ikke forklares med annet enn naturlige tetteprosesser. I denne aktiviteten har fokus vært på betydningen av oksidasjonsprosesser og utfellinger for naturlig tetting. Det ble iverksatt feltundersøkelser for om mulig å påvise naturlige tettemekanismer. Laboratorietester for å kunne forstå mekanismene bak en slik effekt er presentert i Rapport nr. 22. Hensikten var å fremskaffe kunnskap som kan brukes til å iverksette konkrete tiltak for å fremme naturlig tetting. Arbeidet er utført av Lars Hem, Aquateam.

Det er utført målinger av vannkvalitet og analyse av utfellinger i flere tunneler. I tillegg er det utført laboratorieforsøk for å se på mulige utfellingsmekanismer. Resultater viser at både den totale mengden jern og andelen av jern som er oppløst i lekkasjevannet, er høyest i tunneler der en påviser store lekkasjer. I tunneler med relativt liten grad av innlekkasje var jerninnholdet i vannet generelt lavt. Jern, og i mindre grad kalsium, barium og mangan, finnes i partikulær form i vann som lekker inn i tunnelene. Jernutfellingen er forklart med at jernet er treverdlig. Utfelling av kalsium som ble observert, trolig som kalsiumkarbonat, må ses i sammenheng med pH-økning som sekundæreffekt av injeksjon av sement.

I laboratorieforsøk ble det påvist at tilførsel av oksygen til vann med mye toverdlig jern medfører oksidasjon av toverdlig til treverdlig jern og utfelling i et sandfilter. Trykktapsoppbyggingen gikk vesentlig raskere med oksygen til stede enn uten oksygen. Den var også svært avhengig av kornstørrelsen på sanden i filteret/kolonnen. Noen effekt av vannets salinitet ble ikke påvist. Det ble påvist utfelling av manganforbindelser, men effekten var relativt liten sammenlignet med jernutfellingene og vil ikke ha betydning hvis ikke grunnvannet inneholder mye mangan. Det ble også påvist at samvirket mellom jernutfelling og tilstedeværelse av mineralske partikler påvirket både utfelling av jern og partikkelstørrelsesfordelingen.

Det er i dette arbeidet studert hvilke sammenhenger som finnes mellom kjemiske reaksjoner, primært oksidasjon og utfelling. Muligheter til å bruke kunnskapen for å redusere innlekkasje er ikke berørt. Videre arbeid kan finne ut om de naturlige tettemekanismene kan utnyttes i praksis ved å akselerere oksidasjon og utfelling av jernhydroksid og eventuelt manganoksid for å redusere innlekkasje. Det er blant annet foreslått å injisere med luft på steder med relativt stor innlekkasje og studere effekten nærmere. Forståelsen av lokal vannkjemi og samspillet med den lokale geologien må selvsagt tillegges stor vekt.

**Rapport nr. 22: Naturlige tetteprosesser** (Hem et al. 2003)

**Rapport nr. 13: Naturlig tetting av tunneler** (Hem 2002)

En presentasjon av foreløpige resultater på kursdagene i Trondheim i 2002.

## 4.5 Vanninfiltrasjon

Vanninfiltrasjon brukes for å opprettholde poretrykk og grunnvannstand under anleggsperioden. Det ble i prosjektet besluttet å samle kjent kunnskap og erfaringer samt anbefalinger for bruk av vanninfiltrasjonsanlegg i Norge, i Rapport nr. 30. Anette Wold Magnussen og Vidar Kveldsvik ved Norges Geotekniske Institutt (NGI) har utarbeidet rapporten.

Formålet var å etablere et grunnlag for prosjektering, drift og vedlikehold av vanninfiltrasjonsanlegg for å motvirke uønskete konsekvenser ved innlekkasje av grunnvann til tunneler eller andre undergrunnsanlegg. Slike konsekvenser kan være redusert poretrykk i nærliggende leirfylte dyprenner og medfølgende setninger og skader på byggverk, eller endring av grunnvannsstand som kan påvirke naturmiljøet. Det er sammenstilt praktiske erfaringer fra en rekke anlegg, og gitt anbefalinger for etablering og bruk.

Ingen av vanninfiltrasjonsanleggene som er i drift etter at tunnelen er tatt i bruk, har vært planlagt som permanent tiltak. Driften av dem har måttet fortsette som nødløsninger fordi tunnelene ikke har blitt tette nok. Anleggene krever betydelig oppfølging og kontroll, og i rapporten frarådes bruk og planlegging av vanninfiltrasjonsanlegg på permanent basis. Slike anlegg bør inngå i en plan der tunnelen tettes godt nok, og med vanninfiltrasjon som midlertidig tiltak i anleggsfasen for å opprettholde grunnvannstanden.

Erfaringer med brønner i løsmasser og i berggrunn er presentert. En av konklusjonene er at løsmassebrønner, spesielt i marine sedimenter, frarådes. De er generelt ikke i stand til å opprettholde poretrykket, i tillegg har det vært betydelige problemer med erosjon. Brønner i berggrunn gir god effekt og avhenger av god planlegging og undersøkelser av bergmassekvalitet og oppsprekking.

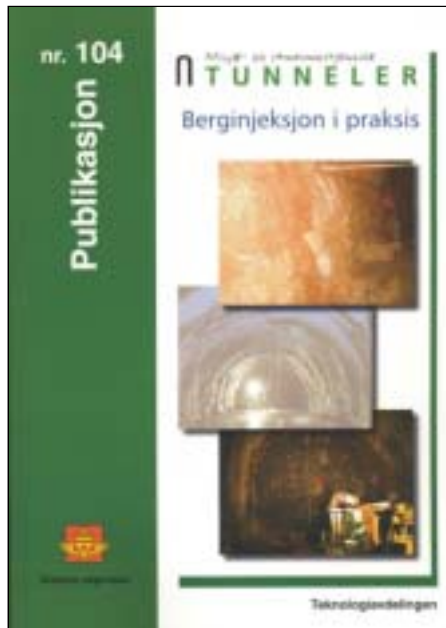
Som en oppsummering er de viktigste anbefalinger når det gjelder vanninfiltrasjon i marine avsetninger:

- Metoden anbefales primært brukt som midlertidig tiltak i byggefasen
- Permanente anlegg bør generelt unngås, og betraktes som nødløsninger.

**Rapport nr. 30: Vanninfiltrasjon. Erfaringer og anbefalinger**  
(Wold Magnussen og Kveldsvik 2003).



## 4.6 Berginjeksjon i praksis



**Publikasjon nr. 104:**  
**Berginjeksjon i praksis**  
(B. H. Klüver og A. Kveen).

Publikasjon nr. 104 er sluttrapporten fra delprosjekt C, og en anbefaling for utførelse av berginjeksjon. Aktiviteten var i innledningen av prosjektet et samarbeid med Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk (NFF) og arbeidet med revisjon av NFFs håndbok nr. 1 «Berginjeksjon», der resultatene fra prosjektet skulle være en del av bidraget til revisjonen. Det var et tydelig behov for å oppdatere denne håndboka fra 1995, som ble utgitt til Fjellsprengningsdagen i november 2002.

Delprosjektgruppa ønsket å avvente arbeidet slik at de siste resultatene, erfaringene og anbefalingene fra dette prosjektet ble samlet. Arbeidet ble dermed konsentrert om utformingen av et sluttprodukt for delprosjekt C: Tettetechnik, i form av en brukervennlig håndbok for injeksjon av tunneler. Grunnlaget for boka er gitt i Intern rapport nr. 2151 «Berginjeksjon», av Bjørn Helge Klüver. Arbeidet er utført av Alf Kveen og Bjørn Helge Klüver, Statens vegvesen samt deltagerne i delprosjektgruppa.



**Figur 4.4:**  
Lekkasjer i tunnel og kostbar etterinjeksjon unngås med et godt planlagt injeksjonsopplegg (foto: H. Hamar).

## Teoretisk grunnlag

Den norske praksisen med å forinjisere med svært høye trykk har vært omdiskutert. For å forklare prosessene og mulige effekter på bergmassen fikk Nick Barton i oppdrag av prosjektet å lage et teoretisk grunnlag for forinjeksjon (Rapport nr. 29). Denne rapporten tar for seg sprekkeegenskaper og vannstrømning og mulige sprekkeformasjoner ved høye injeksjonstrykk.

I det følgende gis et sammendrag av konklusjonene:

- Vellykket forinjisering er ofte avhengig av høyt trykk (5–10 MPa) og fin sement. Resultatet avhenger av effektivt spenningsnivå og sprekkenes karakter
- Høytrykks-forinjisering er en kontrollert sprekkeåpningsprosess som gir et betydelig trykkfall etter inngang. Sprekker under høyt trykk overfører spenninger, og sammen med ruheten i sprekkeveggene hindrer det strømmingen. Med lokal redusert effektivspenning kan stivheten i kontaktpunktene utvide sprekkeåpningene. Tap av positiv effektivspenning nærmest hullet vil føre til hydraulisk splitting. Det medfører at høyt avslutningstrykk krever at strømmingen fremdeles er i gang
- Vanntapsmålinger (Lugeon) har trykkbegrensningen  $\Delta P = 1$  MPa, mens høytrykks-injisering utføres med trykk opp til  $\Delta P = 10$  MPa. Masseinntrengning kan derfor ikke beskrives direkte med modeller for vannstrømning. Vanntapsmålinger kan overføres til enkle modeller der gjennomsnittsverdier av hydraulisk sprekkeåpning konverteres til verdier for gjennomsnittsinjiserbar åpning
- Neste fase er estimering av sprekkeparametre som beskriver veggfasthet, sprekkeruhet og trykkfasthet. Modellering av effektivspenning–sprekkeåpning med disse parametrene danner grunnlag for forklaring av forskjellen mellom hydraulisk sprekkeåpning og injiserbar sprekkeåpning
- Erfaring viser at inngang til de ulike sprekkesett kan forekomme ved forskjellige trykknivåer, samt en suksessiv injisering av de forskjellige sprekkesett
- Q-parametrene består av sprekkerrelevante parametre, og det er rimelig å anta en forbedring av flere av parametrene, og dermed forbedrete bergmasseparametre som resultat av en vellykket forinjisering. Påvirkningen vil avhenge av sprekkekarakteren som beskriver mineralbelegg eller leirefylling
- En klassifisering av forbedrete Q-verdier som resultat av injisering kan danne grunnlaget for valg av redusert permanent sikring. En bieffekt fra tettingen kan være at kostnader blir redusert i utvalgte tunnelstrekninger ved redusert tidsforbruk på grunn av lengre salver og redusert endelig sikringsmengde.

**Rapport nr. 29: Teoretisk og empirisk forståelse av forinjisering og mulighet for redusert sikringsmengde i utvalgte tunnelstrekninger (Barton 2003).**

## Dokumentasjon

Delprosjektgruppa deltok aktivt ved injeksjonsarbeidet i T-baneringtunnelen. Arbeidet her er grundig dokumentert (se kapittel 4.3) og utgjør et viktig grunnlag for utarbeidelsen av anbefalte prosedyrer. I tillegg er det innhentet dokumentasjon fra vellykkete injeksjonsprogram i andre tunneler, drevet i regi av Statens vegvesen:

- Storhaugtunnelen i Stavanger. Injeksjon i fyllitt, med en bergoverdekning ned til 5 m og overliggende torvmyr og bebyggelse.
- Hagantunnelen på rv 4, Nittedal. Injeksjon i syenitt med åpne sprekker, overdekning ned til 6 m og overliggende bebyggelse.

I begge tunnelene ble kravene til innlekkasje oppfylt uten noen rapporterte skader på overflaten. Det som synes å være avgjørende for disse vellykkete prosjektene er et godt gjennomtenkt opplegg for injisering og tett oppfølging fra byggherresiden. Tunnelene representerer ekstreme tilfeller med hensyn til bergforhold, overdekning og tettekrav. Fordi aktiv injeksjon har vært vellykket i disse tilfellene, kan det konkluderes med at injeksjon kan lykkes i alle andre tunneler ved å bruke metodikken og den tiden som kreves.

Innsamling av erfaringer fra injeksjonsarbeidene i en rekke ferdige tunneler (se kapittel 4.3) bidrar også i grunnlaget for anbefalingene i Publikasjon nr. 104. Sammenstillingene av injeksjonsmengder og utførelse i forhold til ulike bergartstyper og krav til innlekkasje er verdifullt ved utarbeidelse av nye anbud og kontrakter, og kan blant annet bidra til større presisjon i mengdeanslagene.

## Bergmasseegenskaper

I publikasjonen defineres fire ulike bergartstyper ut fra ingeniørgeologiske trekk og hva som kan forventes av injeksjonsinnsats for de ulike typene, blant annet forslag til antall hull, hull-lengder, vann/sement-forhold og sementtyper.

Bergartstypene er:

A: Bergmasse med åpne sprekker uten vesentlig sprekkebelegg (f.eks. sandstein, kvartsitt, Oslofeltets lavabergarter og intrusiver). Bergmassen er vanligvis lett å injisere, konduktiviteten er høy med lav motstand mot inntrengning av masse.

B: Bergmasse med sprekker belagt med sprekkefylling og som har tendens til kanal-dannelse (f.eks. gneisbergarter, utgjør hoveddelen av norsk berggrunn). Bergmassen er middels lett å injisere, varierer med mengde av leirfylling.

C: Tette, plastiske bergarter med høy grad av sprekkefylling og opptreden av små kanaler på tynne sprekker (f.eks. leirskifre, fyllitter, glimmerskifre, grønnstein, grønn-skifer). Bergmassen har som regel lav konduktivitet og er ofte vanskelig å injisere.

D: Ulike bergmasser med ekstrem åpen oppsprekking eller åpne rom i berget som resultat av tektonisk påvirkning eller karstdannelse.

## Aktiv injeksjon

Begrepet «aktiv injeksjon» er innført for å beskrive metoden som ut fra dokumentasjon fra en rekke anlegg gir størst sikkerhet ved gjennomføring og å oppfylle kravene til tetthet. Beskrivelsen er basert på erfaringer fra injeksjonsarbeidet i flere vellykkete og veldokumenterte anlegg, og dekker ulike bergartstyper og vanskelighetsgrader.

Aktiv injeksjon innebærer en forståelse for følgende elementer: bergets egenskaper, injeksjonstrykk, injeksjonsmassens egenskaper, mengde injeksjonsmasse, injeksjons-skjermens geometri og hullantall.

Metoden går ut på at trykkoppbygging i hvert hull styres aktivt ved kontinuerlig overvåking og regulering av vann/semest-forholdet. Trykkoppbyggingen i hvert hull skal være jevnt stigende og med så høyt sluttrykk som forholdene tillater, opp mot 100 bar, for å sikre inntrengning av masse. Vann/semest-forholdet skal være så lavt som praktisk mulig for å oppnå markant trykkfall ut i bergmassen og sikre at masseinngangen finner sted nær bergrommet. Skjermgeometrien tilpasses de stedlige forholdene, i innledningsfasen anbefales mange hull i profil og i stuff, med eventuelle justeringer etter vurdering av resultatene. Moderne injeksjonsrigger og pumper som gir høye trykk sikrer god utførelse og dokumentasjon av arbeidet.

Metoden har som nevnt gitt vellykkete resultater i flere tunneler med strenge krav til innlekkasje og lav bergoverdekning. Det er i dag fullt mulig å gjennomføre teknisk kompliserte anlegg med full kontroll på grunnvannet ved bruk av systematisk semest-basert forinjeksjon.



**Figur 4.3:** Fra Tanumtunnelen (Jong–Asker). Bildet viser en injeksjonsskjerm med hull i såle, rundt profilet og i stuffen. Etablert praksis har vist at det er fordelaktig å starte en injeksjonsrunde med å injisere sålehullene først. Deretter injiseres vegg hullene sammen med stuff hullene suksessivt og til slutt hullene i hengen (foto: Alf Kveen).

## Oppsummering

Resultater og anbefalinger ved forinjeksjon av tunneler kan sammenfattes i noen enkle punkter:

- Forinjeksjon er den beste og mest effektive metoden for vanntetting av tunneler
- Lavt vann/semest-forhold kombinert med høyt trykk er en forutsetning for vellykket injeksjon fordi området nærmest tunnelen tettes (f.eks.  $v/c = 0,5$ ; trykk: 100 bar/10 MPa)
- Bruk av mikro- eller industrisement tilpasses bergforholdene. Det er ingen nye, entydige anbefalinger. Resultatene er avhengig av tilsetningsstoffer som sikrer injeksjonsmassens fasthetsegenskaper og stabilitet ved høye trykk. Det arbeides med å utvikle metoder og utstyr for testing av sementer
- Tunnelen tettes fra sålen og oppover. Mange hull i profilet og i stoff tetter mest effektivt
- Systematisk forinjeksjon på strekninger med strenge tettekrav gir best resultat
- Ved gode bergforhold/mindre strenge krav til innlekkasje over lengre strekninger kan det legges til rette for tidsoptimal drift
- En tett tunnel minsker behovet for vann- og frostsikringskonstruksjoner, sannsynligvis og stabilitetssikring
- Et vellykket tetteresultat forutsetter god organisering og oppfølging fra byggherresiden, erfarne folk på stoff og godt utstyr.

## 5 OPPSUMMERING OG KONKLUSJONER

«Miljø- og samfunnstjenlige tunneler» er et omfattende forskningsprosjekt som har gitt tunnelbransjen en enestående mulighet til å heve kompetansen og sette fokus på grunnvannsproblematikk ved tunnelbygging gjennom et tverrfaglig samarbeid i tre delprosjekter: Forundersøkelser, Samspill med omgivelsene og Tetteteknikk.

«Miljø- og samfunnstjenlige tunneler» har vært finansiert av byggherrer, entreprenører og Norges forskningsråd, i tillegg har representanter fra konsulenter, forsknings- og utdanningsinstitusjoner deltatt i prosjektet. Målsettingen var å oppnå større sikkerhet mot miljøskader relatert til grunnvann, ved å utvikle metoder for forundersøkelser og injeksjonsstrategi som bidrar til større teknisk og økonomisk sikkerhet ved gjennomføring av tunnelprosjekter. Store deler av prosjektet har vært rettet mot praktisk utprøving og oppfølging ved pågående tunnelanlegg, som har gitt et effektivt og realistisk utbytte av arbeidene.

Resultatene i prosjektet har dokumentert at det i dag er fullt mulig å gjennomføre kompliserte tunnelprosjekt med god kontroll på grunnvann og innlekkasjer.

### Resultatene fra prosjektet

Resultatene er fremstilt i en serie på 40 fagrapporter og i fire hovedrapporter (Publikasjon nr. 101–104). Disse publikasjonene er verdifulle verktøy til hjelp ved planlegging, prosjektering og bygging av tunneler.

#### Publikasjon nr. 101: Riktig omfang av undersøkelser for berganlegg

Det er utarbeidet et system for å definere et anbefalt omfang av undersøkelser. Målet med dette systemet er å få ut de data som er nødvendig for en vellykket gjennomføring av det enkelte tunnelprosjekt basert på grunnforholdene på stedet og de krav som stilles til det enkelte anlegget. I denne forbindelse er det også viktig å vurdere muligheten for nye metoder og hvilke typer data de nye metodene kan bidra med. Dokumentasjon fra ca. 20 ferdige anlegg er gjennomgått og vurdert for å underbygge utredningen.

#### Publikasjon nr. 102: Delprosjekt A, Forundersøkelser – Sluttrapport

Prosjektet har prøvd ut og sammenlignet nye og etablerte metoder for forundersøkelser som mest mulig effektivt lokaliserer forhold som vil ha betydning for tunneldriften. Flere av metodene har tidligere ikke vært brukt ved tunnelprosjektering, og resultatene har åpnet for et bedre utvalg av metoder og verktøy. For eksempel finnes flere muligheter for effektiv regional kartlegging av mulige svakhetssoner, og metoder som gir mer detaljert informasjon om forløp av svakhetssoner i berggrunnen og lekkasjepotensiale. Metodene er raske og enkle og koster ikke mer enn de tradisjonelle, og de er svært interessante alternativer i områder der det er viktig å ha kontroll på grunnforholdene.

Publikasjon nr. 103: Undersøkelser og krav til innlekkasje for å ivareta ytre miljø

Det er utarbeidet prosedyrer for bestemmelse av innlekkasjekrav i både naturområder og urbane områder ut fra hva et område kan tåle og hva som kan aksepteres av grunnvannssenkning og poretrykksendringer. Som grunnlag for dette arbeidet er det utviklet et system for å registrere og klassifisere sårbare vegetasjonstyper og vannkilder, og evaluere konsekvenser ved endring i grunnvannsnivå. I tillegg er det prøvd ut flere typer modelleringsprogram og beregningsmetoder for å komme opp med scenarioer for tunnellekkasjer og konsekvenser for omliggende områder. Denne typen arbeid kan utføres i god tid før tunnelen bygges, modellene må imidlertid utprøves videre for å bli mer presise. Publikasjonen er enestående i sitt slag, det finnes ingen tilsvarende systematisk gjennomgang av konsekvensvurderinger av grunnvann, åpne vannkilder, vegetasjon og setningsproblematikk i forbindelse med tunnelbygging.

Publikasjon nr. 104: Berginjeksjon i praksis

Sluttrapporten fra delprosjekt C: Tetteteknikk er konsentrert om praktisk utførelse av berginjeksjon. Begrepet "aktiv injeksjon" er definert i prosjektet for å beskrive den metoden for systematisk sementbasert forinjeksjon som med stor grad av sikkerhet oppfyller de fastsatte krav til innlekkasje. Metoden er basert på erfaringer og dokumentasjon av injeksjonsarbeidene ved en rekke vellykkete og veldokumenterte anlegg, og som dekker ulike bergartstyper, lav bergoverdekning og strenge krav til innlekkasje. Metoden innebærer blant annet kontroll med trykkoppbyggingen, vann/semest-forholdet og skjermgeometrien, og kvalifisert oppfølging av injeksjonsprogrammet. Resultatene viser at med dagens kunnskap er det fullt mulig å gjennomføre teknisk kompliserte anlegg med full kontroll på grunnvannet. Dette krever blant annet et gjennomtenkt opplegg for injeksjon og ikke minst tett oppfølging fra byggherresiden.

I tillegg til injeksjonsstrategi for vanskelige områder har delprosjektet arbeidet med dokumentasjon av materialeegenskaper for injeksjonssementer og naturlige tetteprosesser.

### **Målsettingene er oppnådd**

Resultatene i prosjektet er svært lovende, og har bragt oss et langt skritt videre med hensyn til å evaluere potensialet til nye metoder, materialer og teknikker, og å utnytte disse mest mulig effektivt.

Resultatene gir et bedre grunnlag for å lokalisere sårbare områder og forutsi problemer som kan oppstå ved tunnelbygging. Dette gjør at vi kan få bedre prognoser og mer realistiske kostnadsoverslag ved å anvende riktige metoder og utstyr. En systematisert metode for sementbasert forinjeksjon gjør at vi med stor grad av sikkerhet kan oppfylle kravene til innlekkasje som er gitt for en tunnel.

### **Tunneler som satsningsområde**

Tunneler gir store fordeler som del av transportnettet og er blitt et stadig viktigere element i infrastrukturen ved at trafikken legges under eksisterende bebyggelse eller naturområder. I bymiljø betyr tunnelbygging som regel strenge krav til tetthet og gruntliggende tunneler, ofte med dårlige bergforhold. Dette medfører en stadig utvikling

mot mer effektive metoder for tunneldriving og tetting og mer avanserte teknologiske løsninger. Det blir viktigere å avdekke mulige problemer i størst mulig grad før tunnelen bygges, og dette krever bedre planlegging med færre muligheter for feilvurderinger.

Resultatene i prosjektet vil være viktige verktøy for å løse denne type problemstillinger, og bidrar til moderne tunnelbygging med god kontroll i forhold til fastsatte krav.

### **Hva bør gjøres videre?**

En doktorgradsoppgave er initiert av prosjektet, med temaet sammenheng mellom regionalgeologi/strukturegeologi og vannlekkasjer i tunneler, og vil pågå til 2005. Målet med oppgaven er å komme fram til anbefalte prosedyrer og retningslinjer som vil gi sikrere prognoser med hensyn til vannlekkasjer for fremtidige tunnelanlegg. Arbeidet baseres på erfaringer og dokumentasjon fra en rekke ferdige anlegg og fra resultatene som er fremkommet i dette prosjektet, og representerer en videreføring av prosjektaktivitetene.

Det vil være en viktig oppgave å behandle dokumentasjonen fra Jong-Asker anlegget, som er et betydelig utbyggingsprosjekt og der det finnes mye data tilgjengelig fra blant annet overvåkingsprogrammet for grunnvann og registreringer i tunnelene. Det dokumenterte injeksjonsopplegget i de to tunnelene vil være et verdifullt supplement til erfaringer og dokumentasjon av injeksjonsarbeidet og resultater fra de øvrige tunnelene som er studert i «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler». En sammenstilling av utførte undersøkelser mot ferdig tunnel vil på samme måte representere en komplettering av det arbeidet som er påbegynt i prosjektet.

«Miljø- og samfunnstjenlige tunneler» har utviklet en rekke nye metoder som legger til rette for gjennomføring av vellykkete tunnelprosjekt uten skader på ytre miljø og uten overskridelser med hensyn til tid og kostnader. Vi har ikke fått alle svarene i løpet av denne prosjektperioden. Nye verktøy er tilgjengelig for fagmiljøet, men resultatene er til ingen nytte hvis de ikke blir brukt eller tilpasses til praktisk bruk med muligheter for justeringer og forbedringer basert på erfaringer. Arbeidet i prosjektet har understreket betydningen av at byggherrens ansvar for oppfølging og dokumentasjon er avgjørende for en vellykket gjennomføring. En viktig del av arbeidet framover blir å tilpasse metodene i kontrakter og anbud, samt gjøre kjent innen bransjen hvilket potensiale som ligger i nye metoder og nytt utstyr.



## REFERANSER

Alteren, B.: *Resultatrapport fra injiseringsforsøk*. Intern rapport nr. 2294; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 18. Vegdirektoratet, Teknologidivisjonen, Oslo 2002. 21 s. (SINTEF rapport: STF22 F02138)

Alteren, B. og Beitnes, A.: *Prosedyrer for injiseringsforsøk*. Intern rapport nr. 2295; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 19. Vegdirektoratet, Teknologidivisjonen, Oslo 2002. 5 s. (SINTEF rapport: STF22 F02147)

Andersson, H.: *Injeksjon – erfaringer fra Lunnertunnelen*. Intern rapport nr. 2313; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 23. Vegdirektoratet, Teknologidivisjonen, Oslo 2003. 34 s.

Andersson, H.: *Injeksjon – erfaringer fra Hagantunnelen*. Intern rapport nr. 2325; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 31. Vegdirektoratet, Teknologidivisjonen, Oslo 2003. 30 s.

Barton, N.: *Teoretisk og empirisk forståelse av forinjeksjon og mulighet for redusert sikringsmengde i utvalgte tunnelstrekninger*. Intern rapport nr. 2323; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 29. Vegdirektoratet, Teknologidivisjonen, Oslo 2003. 140 s.

Beard, L.: *Vurderinger av geofysiske anomalier ved Langvatnet med bruk av helikoptermålinger*. Intern rapport nr. 2247; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 5. Vegdirektoratet, Teknologidivisjonen, Oslo 2001. 40 s. (NGU rapport 2001.046)

Bendiksen, E., Often, A. og Erikstad, L.: *Befaring av eksisterende tunneler med lekkasjer. Vurdering av betydning for naturmiljø*. Intern rapport nr. 2349; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 40. Vegdirektoratet, Teknologidivisjonen, Oslo 2004. 45 s.

Bhasin, R. og Kveldsvik, V.: *Frøyatunnelen. Vurdering av injeksjon i forhold til Q-parametre*. Intern rapport nr. 2261; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 11. Vegdirektoratet, Teknologidivisjonen, Oslo 2002. 37 s. (NGI rapport 20001042)

Boge, K., Åndal, T., Aasen, O. og Kjølberg, R.: *Sluttrapport for injeksjonsarbeidene ved T-baneringen*. Intern rapport nr. 2289; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 16. Vegdirektoratet, Teknologidivisjonen, Oslo 2002. 229 s.

Cuisiat, F., Skurtveit, E. og Kveldsvik, V.: *Prediction of leakage into Lunner tunnel based on discrete fracture flow models*. Intern rapport nr. 2318; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 27. Vegdirektoratet, Teknologidivisjonen, Oslo 2003. 55 s. (NGI rapport 20001042-2)

Dalsegg, E., Elvebakk, H. og Rønning, J.S.: *Geofysiske bakkemålinger og borehullslogging, Jong–Asker, Asker og Bærum, Akershus*. Intern rapport nr. 2343; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 34. Vegdirektoratet, Teknologidivisjonen, Oslo 2003 (a). 75 s. (NGU rapport 2003.006)

Dalsegg, E., Elvebakk, H. og Rønning, J. S.: *Geofysiske bakkemålinger og borehullslogging på Krokskogen, Ringerike og Hole, Buskerud*. Intern rapport nr. 2344; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 35. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2003 (b). 45 s. (NGU rapport 2003.007)

Dalsegg, E., Elvebakk, H., Muring, E., Rønning, J. S., og Tønnesen, J. F.: *Geofysiske bakkemålinger og borehullslogging, E39, Skaun kommune, Sør-Trøndelag*. Intern rapport nr. 2345; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 36. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2003 (c). 80 s. (NGU rapport 2003-067)

Dalsegg, E. og Rønning, J. S.: *Geofysiske målinger, Langvatnet – øst, Lunner, Oppland*. Intern rapport nr. 2305; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 21. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2003. 17 s. (NGU rapport 2002.106)

Davik, K. I.: *Miljø- og samfunnstjenlige tunneler – et bransjeprojekt; prosjektbeskrivelse 2000–2003*. Intern rapport nr. 2201; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 1. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2001. 55 s.

Dehls, J. F. og Nordgulen, Ø.: *Analysis of INSAR-data over Romeriksporten*. Intern rapport nr. 2346; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 37. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2003. 18 s. (NGU rapport 2003.076)

Elvebakk, H., Braaten, A. og Rønning, J. S.: *Borehullslogging og strukturgeologiske studier, Gualia, Lunner kommune*. Intern rapport nr. 2259; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 10. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2002. 70 s. (NGU rapport 2001.117)

Elvebakk, H. og Rønning, J. S.: *Inspeksjon og logging av brønner over Romeriksporten; vurdering av lekkasjepotensial og stabilitet*. Intern rapport nr. 2254; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 8. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2001. 51 s. (NGU rapport 2001.094)

Elvebakk, H. og Rønning, J. S.: *Borehullsinspeksjon; en utprøving og sammenligning av optisk og akustisk televiwer*. Intern rapport nr. 2255; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 9. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2001. 42 s. (NGU rapport 2001.011)

Elvebakk, H. og Rønning, J. S.: *Borehullslogging i fjellbrønn, Holmedal, Sunnfjord; verifisering av hydrogeologisk modell med hensyn til bergspenning, oppsprekking og strømningsretning*. Intern rapport nr. 2317; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 26. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2003. 33 s. (NGU rapport nr. 2002.093)

Elvebakk, H., Rønning, J. S. og Storrø, G.: *Borehullslogging i fjellbrønn, Folvåg, Sunnfjord; en verifisering av lineamentsmodell med hensyn til oppsprekking og vanngivevne*. Intern rapport nr. 2316; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 25. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2003. 39 s. (NGU rapport nr. 2002.078)

Hem, L. J. (Aquateam): *Naturlig tetting av tunneler*. Intern rapport nr. 2274; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 13. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2002. 6 s.

Hem, L., Bruås, L. og Vik, E. A.: *Naturlige tetteprosesser*. Intern rapport nr. 2306; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 22. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2003. 42 s. (Aquateam rapport 02-053)

Holm, J. V. og Heimli, P.: *Laboratorietesting av mikrosemeter ved T-baneringen*. Intern rapport nr. 2235; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 4. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2001. 94 s. (NOTEBY rapport 100212-1)

Holm, J. V. og Heimli, P.: *Laboratorieprøving av injeksjonssemeter*. Intern rapport nr. 2250; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 6. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2001. 70 s. (NOTEBY rapport 100212-2)

Holmøy, K. H.: *Oppsummering av utførte undersøkelser og prognose for innlekkasje ved Grualiatunnelen*. Intern rapport nr. 2284; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 15. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2002. 25 s.

Karlsruud, K., Erikstad, L. og Snilsberg, P.: *Miljø- og samfunnstjenlige tunneler; Undersøkelser og krav til innlekkasje for å ivareta ytre miljø*. Publikasjon nr. 103. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2003. 95 s.

Karlsruud, K., Kveldsvik, V., Snilsberg, P., Søvik, A. K., Erikstad, L., Bendiksen, E., Tuttle, K., og Worsely, R. T.: *Konsekvenser av tunnellekkasjer for det ytre miljø; statusrapport 2001*. Intern rapport nr. 2276; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 14. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2002. 79 s.

Klüver, B. H.: *Berginjeksjon*. Intern rapport nr. 2151. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2000. 21 s.

Klüver, B. H.: *Miljø- og samfunnstjenlige tunneler. Delprosjekt D: Organisering; rapport fra forprosjektet*. Intern rapport nr. 2131. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2000. 7 s.

Klüver, B. H. og Kveen, A.: *Miljø- og samfunnstjenlige tunneler; Berginjeksjon i praksis*. Publikasjon nr. 104. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2003. 70 s.

Løset, F. og Kveldsvik, V.: *T-bane Ullevål stadion – Nydalen: forundersøkelser og injeksjon*. Intern rapport nr. 2331; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 33. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2003. 51 s. (NGI rapport: 20001042-5)

Neeb, P. R. og Grøv, E.: *Miljø- og samfunnstjenlige tunneler. Delprosjekt A: Forundersøkelser; rapport fra forprosjektet*. Intern rapport nr. 2128. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2000. 102 s.

Nilssen, P. og Beitnes, A.: *Sluttrapport sprekkemodellen*. Intern rapport nr. 2321; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 28. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2003. 11 s. (SINTEF rapport: STF22 F03122)

Nordgulen, Ø. og Dehls, J.: *Bruk av digitale høydedata i strukturgeologisk analyse: eksempel fra Oslo kommune*. Intern rapport nr. 2315; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 24. Vegdirektoratet, Teknologidivisjonen, Oslo 2003. 10 s. (NGU rapport 2003.013)

Palmstrøm, A., Nilsen, B., Borge Pedersen, K. og Grundt, L.: *Miljø- og samfunnstjenlige tunneler; Riktig omfang av undersøkelser for berganlegg*. Publikasjon nr. 101. Vegdirektoratet, Teknologidivisjonen, Oslo 2003. 135 s.

Pedersen, T. S.: *Miljø- og samfunnstjenlige tunneler. Delprosjekt B: Samspill med omgivelsene; rapport fra forprosjektet*. Intern rapport nr. 2129. Vegdirektoratet, Teknologidivisjonen, Oslo 2000. 100 s.

Rønning, J. S.: *Forundersøkelser tunneler. Nyere undersøkelsesmetoder*. Intern rapport nr. 2273; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 12. Vegdirektoratet, Teknologidivisjonen, Oslo 2002. 12 s.

Rønning, J. S.: *Miljø- og samfunnstjenlige tunneler. Delprosjekt A: Forundersøkelser; sluttrapport*. Publikasjon nr. 102. Vegdirektoratet, Teknologidivisjonen, Oslo 2003. 66 s.

Rønning, J. S. og Dalsegg, E.: *Geofysiske målinger ved Langvatnet, Lunner, Oppland*. Intern rapport nr. 2253; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 7. Vegdirektoratet, Teknologidivisjonen, Oslo 2001. 26 s. (NGU rapport 2001.090)

Snilsberg, P. og French, H.: *Modellverktøy for analyse av virkninger av tunneler på sårbare naturtyper*. Intern rapport nr. 2347; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 38. Vegdirektoratet, Teknologidivisjonen, Oslo 2004. 35 s.

Storrø, G., Elvebakk, H. og Rønning, J. S.: *Hydraulisk testing av borehull i fjell i Gruvalia, Lunner kommune*. Intern rapport nr. 2296; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 20. Vegdirektoratet, Teknologidivisjonen, Oslo 2002. 50 s. (NGU rapport 2002.051)

Tuttle, K.: *Analytiske modeller. Beregning av lekkasjerater, grunnvannsenkning og influensområde*. Intern rapport nr. 2348; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 39. Vegdirektoratet, Teknologidivisjonen, Oslo 2004.

Westerdahl, H.: *Seismisk modellering; modellering av seismiske data over løsmassefylte depresjoner, svakhetssoner og ved kabelheng*. Intern rapport nr. 2328; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 32. Vegdirektoratet, Teknologidivisjonen, Oslo 2003. 25 s. (NGI rapport: 20001042-3)

Wold Magnussen, A. og Kveldevik, V.: *Vanninfiltrasjon. Erfaringer og anbefalinger*. Intern rapport nr. 2324; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 30. Vegdirektoratet, Teknologidivisjonen, Oslo 2003. 75 s. (NGI rapport: 20001042-4)

Aasen, O.: *Miljø- og samfunnstjenlige tunneler. Delprosjekt C: Tetteteknikk; rapport fra forprosjektet*. Intern rapport nr. 2130. Vegdirektoratet, Teknologidivisjonen, Oslo 2003. 120 s.

Åndal, T.: *Injeksjon av "problemzone" ved byggingen av T-baneringen*. Intern rapport nr. 2234; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 3. Vegdirektoratet, Teknologiavdelingen, Oslo 2001. 80 s.

Åndal, T., Andersson, H. og Aasen, O.: *Injeksjon – erfaringer fra utførte tunnelprosjekter*. Intern rapport nr. 2233; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 2. Vegdirektoratet, Teknologiavdelingen, Oslo 2001. 90 s.

# VEDLEGG I

*Deltagerne i delprosjektgruppene, i hele eller deler av prosjektperioden 2000 – 2003.*

**Delprosjekt A:**

Jan Steinar Rønning, NGU  
Øystein Nordgulen, NGU  
Bernt Olav Hilmo, NGU  
Bjørn Nilsen, NTNU  
Kristin H. Holmøy, NTNU  
Arild Palmstrøm, Norconsult  
Vidar Kveldsvik, NGI  
Harald Westerdahl, NGI  
Brede Nermoen, Jernbaneverket  
Johan Mykland, Jernbaneverket  
Kjell Inge Davik, Statens vegvesen / Mesta  
Bjørn Helge Klüver, Statens vegvesen  
Mona Lindstrøm, Statens vegvesen  
Alf Kveen, Statens vegvesen

**Delprosjekt B:**

Kjell Karlsrud, NGI  
Vidar Kveldsvik, NGI  
Fabrice Cuisiat, NGI  
Elin Skurtveit, NGI  
Lars Erikstad, NINA  
Egil Bendiksen, NINA  
Petter Snilsberg, Jordforsk  
Kevin Tuttle, Norconsult  
Kjell Inge Davik, Statens vegvesen / Mesta  
Mona Lindstrøm, Statens vegvesen  
Alf Kveen, Statens vegvesen

**Delprosjekt C:**

Oddbjørn Aasen, NVK/Multiconsult  
Helen Andersson, (NVK) Geotekn. Spiss-  
Teknikk  
Torkild Åndal, (NVK), Statens vegvesen  
Knut Boge, GeoVita  
Reidar Kjølberg, Norconsult  
Per Heimli, NOTEBY/Multiconsult  
Anders Beitnes, SINTEF  
Vidar Kveldsvik, NGI  
Lise Backer, NGI  
Lars Hem, Aquateam  
Eilen A. Vik, Aquateam  
Nick Barton, Nick Barton & Associates  
Arnstein Aarset, Jernbaneverket  
Johan Mykland, Jernbaneverket  
Kåre Digernes, Jernbaneverket  
Kjell Inge Davik, Statens vegvesen / Mesta  
Knut Borge Pedersen Statens vegvesen  
Bjørn Helge Klüver, Statens vegvesen  
Mona Lindstrøm, Statens vegvesen  
Alf Kveen, Statens vegvesen

**Prosjektstyret:**

Magne Paulsen, Jernbaneverket  
Alf Kveen, Statens vegvesen  
Kjell Inge Davik, Statens vegvesen / Mesta  
Mona Lindstrøm, Statens vegvesen  
Kjell Levik, Statens vegvesen  
Helen Riddervold, Statens vegvesen  
Bjørn Erik Selnes, Statens vegvesen  
Hans C. Evensen, NCC Anlegg  
Kjell Ottar Berge, Selmer Skanska  
Bjørn Johnsrud, Selmer Skanska  
Torjus Alten, Veidekke  
Leif Rune Gausereide, Norconsult  
Kjell Karlsrud, NGI  
Bjørn Nilsen, NTNU  
Jan S. Rønning, NGU  
Jørn Lindstad, NFR  
Magne Glomnes AS Oslo Sporveier

## VEDLEGG II FORPROSJEKTET 1999

### II.1 Innledning

Forprosjektet ble gjennomført i 1999. Hele bransjen deltok i arbeidet, med bakgrunn i en felles forståelse for behovet for å heve kompetansen og sette fokus på grunnvannsproblematikk og tunnelbygging. Utgangspunkt for prosjektet er omtalt i kapittel 1.

Arbeidet i forprosjektet var konsentrert om å «konkretisere satsningsområder, strategi og økonomi i et hovedprosjekt», samt foreslå aktivitetsnivå for de ulike satsningsområdene.

Målsettingen for hovedprosjektet var beskrevet som:

«Videreutvikle og forbedre dagens teknologi og gi rom for nytenkning ved å utvikle mer kostnadseffektive, bedre, sikrere og mer miljøvennlig bygging av tunneler».

Arbeidet ble organisert i fire delprosjekter med ansvarlig leder fra fire ulike firmaer. Gruppene var bredt sammensatt med tanke på å favne den faglige bredden i Norge, med deltagelse fra byggherre, entreprenører, konsulenter, forsknings- og utdanningsinstitusjoner. Gruppene avdekket forskningsbehov på en rekke områder. Det ble utarbeidet en rapport fra hver av delprosjektene, utformet som prosjektbeskrivelser for et hovedprosjekt og var vedlagt søknaden til Norges forskningsråd for perioden 2000-2003.

Prosjektrapportene:

Intern rapport nr. 2128: Delprosjekt A: Forundersøkelser. Rapport fra forprosjekt.

Intern rapport nr. 2129: Delprosjekt B: Samspill med omgivelsene.  
Rapport fra forprosjekt.

Intern rapport nr. 2130: Delprosjekt C: Tetteteknikk. Rapport fra forprosjekt.

Intern rapport nr. 2131: Delprosjekt D: Organisering og kontraktsforhold.  
Rapport fra forprosjekt.

I disse beskrivelsene er det lagt opp til et vidtrekkende program, blant annet med forslag til en rekke doktorgradsoppgaver. Prosjektforslagene er beskrevet i henhold til ulike rammer for tildeling av midler. Imidlertid ble tildelingene langt under det som var foreslått, og det var ikke mulig å gå videre med mange av temaene. Rapportene inneholder grundige beskrivelser av prosjektforslagene, og kan fungere som en idébank over forskningstemaer for framtidig arbeid. I det følgende gis en kortfattet oversikt over prosjektforslagene som er beskrevet i de ulike delprosjektrapportene.

### II.2 Forprosjekt A: Forundersøkelser

Arbeidet i delprosjektgruppen ble ledet av Peer Richard Neeb, Norges geologiske undersøkelser (NGU).

Målsettingen for det man ville komme fram til var: «Forundersøkelser skal utføres med metoder og omfang for å sikre at beslutningstaker har tilstrekkelig grunnlag for å vurdere konsekvensene av gjennomføringen av et underjordsprosjekt og etablere realistiske kostnadsoverslag».



Utgangspunktet var å vurdere de metoder og verktøy som er tilgjengelig, hvilke begrensninger de har og hvor det er mulig å sette inn ressurser for å utvikle nye og forbedre eksisterende metoder.

E. Grøv og P.R. Neeb: Delprosjekt A: Forundersøkelser. Rapport fra forprosjekt. Intern rapport nr. 2128.

Følgende forslag til prosjekter/aktiviteter ble beskrevet:

- Normer, standarder og retningslinjer  
Retningslinjer for valg av strategi for forundersøkelser (Riktig omfang av undersøkelser) (Selmer, Norconsult)
- Analyseverktøy
  - Usikkerhets- og risikoanalyser (Jernbaneverket, NTNU): videreutvikle metoder mht. bruk av resultater fra forundersøkelser
  - Hammerboring med dataregistrering (NOTEBY): utvikle teknologi som alternativ til kjerneboring. Instrumentering som registrerer data som kan gi geologisk informasjon: MWD
  - Inngangsparametre til numerisk modellering av anlegg i berg (OTB AS): prosjekt i regi av NBG, basert på bergmekaniske egenskaper til norske bergarter
- Geologiske forundersøkelser (beskrevet av Statens vegvesen, NGI, NGU)
  - Bruk av regionalgeologiske data i ingeniørgeologisk sammenheng: strukturgeologiske data, utvikling av digitale teknikker
  - Eksempelstudier: sammenheng vannlekkasjer og ingeniørgeologiske/regionalgeologiske forhold
  - Brønnefelt og grunnvannstrømning i berg: hydrogeologiske studier under kontrollerte forhold
  - Sammenheng trykkbølgehastighet og bergmassekvalitet, Q-verdier.
  - Norsk tunnelteknologi. (Utarbeidet av Løset, NGI)
- Geofysiske målemetoder (NGU, NTNU, NGI)
  - Inspeksjon av borhull: f.eks. optisk og akustisk televiewer, alternativer til kjerneboring
  - Bruk av helikoptermålinger
  - Retolkning av refraksjonsseismikk
  - Elektrisk tomografi: resistivitetsmålinger, IP
  - Akustisk tomografi: utvikling av metoder (seismisk tomografi)
  - Radar tomografi: georadar, for undersøkelser av vannstrømning i berg, kartlegging av sprekker
- Spenningsmålinger (SINTEF): modelleringer. Effekt av spenninger på innlekkasje og mulighet for tetting.

Mange av disse temaene er med i hovedprosjektet, om enn i noen annen form og omfang enn skissert i forslagene. I prosjektforslagene lå også mange temaer for doktorgradsoppgaver. En doktorgradsoppgave ble igangsatt under prosjektet, med tema som spenner over både forundersøkelser og tetting/vannlekkasjer.

### II.3 Forprosjekt B: Samspill med omgivelsene

Delprosjektgruppen ble ledet av Tor Simon Pedersen, Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE).

Et utgangspunkt for deler av aktivitetene i dette delprosjektet var en ny vannressurslov som var ventet i 2001, og som var antatt å få betydelige konsekvenser for tunnelbygging. I forslagene lå det an til at tunnelbygging med påfølgende drenering kunne utløse konsesjonskrav fra vassdragsmyndighetene. Gruppen hadde mange deltagere, spredt over en rekke fagfelt, med mål å avdekke forskningsbehov og utarbeide forslag til aktiviteter innen både naturvitenskapelige og samfunnsfaglige områder som et grunnlag for konsekvensvurderinger av tunnelprosjekter.

T.S. Pedersen: Delprosjekt B: Samspill med omgivelsene. Rapport fra forprosjekt. Intern rapport nr. 2129.

Temagruppene utarbeidet følgende forslag til satsningsområder og forskningstema:

- Hydrologi, geologi og modeller
  - Hydrogeologiske undersøkelser og vurderinger (NGU, m.fl.): naturlige variasjoner av grunnvannstand i fjell, vanngiverevne, undersøkelser ved hjelp av borebrønner
  - Hydrogeologiske modeller (NVE): vurdere størrelse på lekkasjer, grenser og omfang for å begrense skader
  - Hydrologi (NVE)
- Overflatepåvirkning, utmark (Jordforsk, NINA, NLH)
  - Sårbare områders geohydrologi (Jordforsk)
  - Vegetasjon og vegetasjonsendringer i forhold til hydrologi (NINA)
  - Samspill mellom hydrologi og vannkvalitet/ferskvannøkologi (NLH)
  - Modellering, prediksjonsmodellering og modellvalidering (NINA)
- Overflatepåvirkning, urbanområder (NGI m.fl.)
  - Setningspotensiale, skadepotensiale, GIS-verktøy
  - Vanninfiltrasjon
- Forvaltning, jus og kost/nytte (Jernbaneverket, m.fl.)
  - Rettsregler og beslutningsprosesser
  - Videreutvikling av nytte-kostanalyser / konsekvensanalyser på tunnelteknologi (metodeutvikling av konsekvensanalyser for anvendelse på tunnelprosjekter)
- Informasjon, kommunikasjon og media (VG)

Utarbeide strategier for god og tillitvekkende kommunikasjon med omgivelsene, informasjonsbehov i tunnelprosjekter, bruk av media, med utgangspunkt i tunnelbransjens anseelse.

Siden bevilgningene til hovedprosjektet ble langt lavere enn det som var ønsket og forventet, fant flere deltagere i forprosjektet at det ikke var formålstjenlig å delta videre. I tillegg ble også forvaltnings- og informasjons-delene utelatt i denne sammenhengen.

Basert på nye rammer ble i 2000 Kjell Karlsrud, NGI, bedt om å trekke ut essensen av arbeidet i forprosjektet og skissere en framdrift med utgangspunkt i nytt budsjett og reduserte målsettinger. Hovedprosjektet kom i gang i 2001.

## II.4 Forprosjekt C: Tetteteknikk

Arbeidet i gruppen ble ledet av Oddbjørn Aasen, Norsk vandbyggningskontor (NVK) AS.

Målsettingen for arbeidet var å videreutvikle anerkjente tetningsmetoder og -komponenter med størst forbedringspotensiale, utvikle nye metoder og markedsføre anerkjent teknologi (ny og gammel) innen bransjen.

O. Aasen: Delprosjekt C: Tetteteknikk. Rapport fra forprosjekt. Intern rapport nr. 2130.

Følgende forslag til satsningsområder er beskrevet:

- Videreutvikling - tetningsinjisering av berg
  - Dokumentasjon og utprøving av mikrosemeter i lab (SINTEF, NOTEBY)
  - Dokumentasjon og utprøving på prosjekt mht tidsaspektet (Entreprenørservice AS)
  - Dokumentasjon og utprøving mht aktiv injisering (Dr.ing. B. Buen AS)
  - Dokumentasjon og utprøving på prosjekt mht spesielle forhold (NVK)
  - Lekkasjemålingsteknikk i tunneler under bygging (SINTEF)
  - Kjemikalier anvendt til tetningsmiljø, indre/ytre miljø (GeoVita)
- Markedsføring av anerkjent teknologi (ny og gammel)
  - Håndbok, NFF og andre
  - Tekniske beskrivelser og anbudsgrunnlag
  - Database og dokumentasjon av erfaringer
  - Kurs- og konferansepresentasjoner
  - Sammenligning av prosjekterfaringer og koordinering av FoU-innsats mellom Norge og Sverige
- Videreutvikling - andre metoder
  - Vanninfiltrasjon
  - Vanntett betongutføring (Jbv)
- Utvikle nye metoder
  - Kjemisk utfelling og partikkelavsetning (Aquateam, Statens vegvesen, NOTEBY, NVK)
  - Tetting med gass/luft/tofase (NTNU)
  - Barriereoppbygging i berg (E. Grøv).

Delprosjekt C ble valgt ut som hovedsatsningsområde ved tildeling av midler til prosjektet, men med langt lavere rammer enn ønsket og foreslått. Arbeidet ble igangsatt i 2000 i samarbeid med et konkret tunnelprosjekt.

## II.5 Forprosjekt D: Organisering / kontraktsforhold

Arbeidsgruppen ble ledet av Bjørn Helge Klüver, Statens vegvesen, Vegdirektoratet.

Målet var å utarbeide et system for å forbedre organisering og ledelse av større tunnelprosjekter i Norge. Ved å ta i bruk mer strukturerte beslutningsprosesser øker sannsynligheten for vellykkete og kostnadseffektive tunnelprosjekter.

Det er grunnleggende for et prosjekt at organisasjonen bygges opp i forkant av de oppgaver som skal løses. Tunge beslutninger tas i de tidligste prosjektfaser og det er viktig at relevante problemstillinger blir tatt hånd om på en betryggende måte. I prosjektbeskrivelsen ble det foreslått å utarbeide konkrete retningslinjer for bemanning i forhold til definerte arbeidsoppgaver for å sikre at riktig kompetanse kommer inn på rett tid og sted. I tillegg omfatter forslagene definisjon av de ulike prosjektfasene med tilhørende aktiviteter, og å involvere resultater fra de øvrige delprosjektene.

Delprosjektet ble ikke videreført som eget tema under hovedprosjektet, på grunn av lavere rammer til prosjektet som helhet. Dessuten blir en stor del av disse temaene tatt vare på gjennom overordnede regler og retningslinjer for utbyggingsprosjekter. Et viktig mål i det videre arbeidet er imidlertid å innarbeide resultatene i kontrakter og anbud.

B.H. Klüver: Delprosjekt D: Organisering og kontraktsforhold. Rapport fra forprosjekt. Intern rapport nr. 2131.

## VEDLEGG III Prosjektrapporter nr. 1 – 40

Rapporter fra NFR-prosjektet

Nr.	Intern rapport nr. <sup>①</sup>	Tittel	Del-prosjekt	Dato	Utarbeidet av
1	2201	Prosjektbeskrivelse 2000-2003		Apr 01	Statens vegvesen
2	2233	Injeksjon – erfaringer fra utførte tunnelprosjekter	C	Nov 01	NVK
3	2234	Injeksjon av «problemsoner» ved byggingen av T-baneringen	C	Nov 01	NVK
4	2235	Laboratorietesting av mikrosementer ved T-baneringen	C	Nov 01	NOTEBY
5	2247	Forundersøkelser – vurderinger av geofysiske anomalier ved Langvatnet med bruk av helikoptermålinger	A	Nov 01	NGU
6	2250	Laboratorieprøving av injeksjonssementer	C	Nov 01	NOTEBY
7	2253	Geofysiske målinger ved Langvatnet, Lunner, Oppland	A	Des 01	NGU
8	2254	Inspeksjon og logging av brønner over Romeriksporten. Vurdering av lekkasjepotensial og stabilitet	A	Des 01	NGU
9	2255	Borehullsinspeksjon. En utprøving og sammenligning av optisk og akustisk televiwer	A	Des 01	NGU
10	2259	Borehullslogging og strukturgeologiske studier, Gualia, Lunner kommune	A	Mar 02	NGU
11	2261	Frøyatunnelen. Vurdering av injeksjon i forhold til Q-parametre	A	Mar 02	NGI
12	2273	Forundersøkelser tunneler. Nyere undersøkelsesmetoder	A	Apr 02	NGU
13	2274	Naturlig tetting av tunneler	C	Apr 02	Aquateam
14	2276	Konsekvenser av tunnellekkasjer for det ytre miljø Statusrapport 2001	B	Mai 02	NGI, NINA, Jordforsk, Norconsult
15	2284	Oppsummering av utførte undersøkelser og prognose for innlekkasje ved Gualiatunnelen	A	Mai 02	NTNU
16	2289	Sluttrapport for injeksjonsarbeidene ved T-baneringen	C	Juli 02	GeoVita, NVK, Norconsult
17	2293	Status for NFR-prosjektet, august 2002		Sep 02	Statens vegvesen
18	2294	Resultatrapport fra injiseringsforsøk	C	Sep 02	SINTEF
19	2295	Prosedyrer for injiseringsforsøk	C	Sep 02	SINTEF
20	2296	Hydraulisk testing av borehull i fjell i Gualia, Lunner komm.	A	Sep 02	NGU
21	2305	Geofysiske målinger, Langvatnet – øst, Lunner, Oppland	A	Jan 03	NGU
22	2306	Naturlige tettestresser	C	Jan 03	Aquateam
23	2313	Injeksjon – erfaringer fra Lunnertunnelen	C	Mar 03	NVK
24	2315	Bruk av digitale høydedata i strukturgeologisk analyse: Eksempel fra Oslo kommune	A	Apr 03	NGU
25	2316	Borehullslogging i fjellbrønn, Folvåg, Sunnfjord	A	Apr 03	NGU
26	2317	Borehullslogging i fjellbrønn, Holmedal, Sunnfjord	A	Apr 03	NGU
27	2318	Prediction of leakage into Lunner tunnel based on discrete fracture flow models	B	Apr 03	NGI
28	2321	Sluttrapport sprekkemodellen	C	Mai 03	SINTEF
29	2323	Teoretisk og empirisk forståelse av forinjisering og mulighet for redusert sikringsmengde i utvalgte tunnelstrekninger	C	Juni 03	N. Barton
30	2324	Vanninfiltrasjon. Erfaringer og anbefalinger	C	Juni 03	NGI

<sup>①</sup> Teknologivdelingens rapportserie

(forts.)

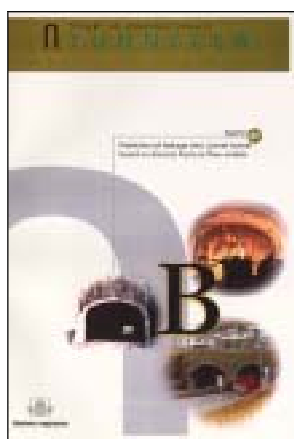
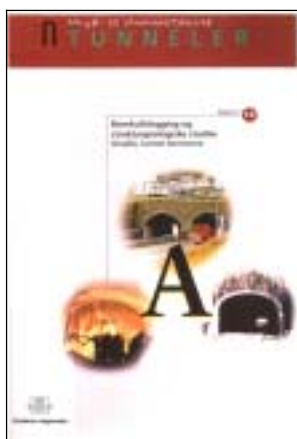
Delprosjekter: A Forundersøkelser, B Samspill med omgivelsene, C Tetteknikk.

## Rapporter fra NFR-prosjektet (forts.)

Nr.	Intern rapport nr. <sup>ⓐ</sup>	Tittel	Del-prosjekt	Dato	Utarbeidet av
31	2325	Injeksjon – erfaringer fra Hagantunnelen	C	Juli 03	Ge-Sp-Tech
32	2328	Seismisk modellering. Modellering av seismiske data over løsmassefylte depresjoner, svakhetssoner og ved kabelheng	A	Juli 03	NGI
33	2331	T-bane Ullevål stadion–Nydaleen: forundersøkelser og injeksjon	A	Aug 03	NGI
34	2343	Geofysiske bakkemålinger og borehullslogging, Jong–Asker	A	Jan 04	NGU
35	2344	Geofysiske bakkemålinger og borehullslogging på Krokskogen	A	Jan 04	NGU
36	2345	Geofysiske bakkemålinger og borehullslogging, E39, Skaun, Sør-Trøndelag	A	Feb 04	NGU
37	2346	Analysis of InSAR data over Romeriksporten	A	Feb 04	NGU
38	2347	Modellverktøy for analyse av virkninger av tunneler på sårbare naturtyper	B	2004	Jordforsk
39	2348	Analytiske modeller – beregning av lekkasjerater, grunnvannsenkning og influensområde	B	2004	Norconsult
40	2349	Befaring av eksisterende tunneler med lekkasjer. Vurdering av betydning for naturmiljø.	B	Jan 04	NINA

<sup>ⓐ</sup> Teknologiavdelingens rapportserie

Delprosjekter: A Forundersøkelser  
B Samspill med omgivelsene  
C Tetteteknikk.



# Publikasjoner fra Teknologivdelingen

45. Proceedings of the International Research Symposium on Pavement Wear, Oslo 6th-9th June 1972. 227 p. 1973.
46. Frost i veg 1972. Nordisk Vegteknisk Forbunds konferanse i Oslo 18-19 sept. 1972 (Frost Action on Roads 1972. NVF Conference in Oslo 1972). 136 p. 1973.
47. Å. KNUTSON. Praktisk bruk av bark i vegbygging (Specifications for Use of Bark in Highway Engineering).  
E. GJESSING, S. HAUGEN. Barkavfall – vannforurensning (Bark Deposits – Water Pollution). 23 p. 1973.
48. Sikring av vegtunneler (Security Measures for Road Tunnels). 124 p. 1975.
49. H. NOREM. Registrering og bruk av klimadata ved planlegging av høg fjellsveger (Collection and Use of Weather Data in Mountain Road Planning).  
H. NOREM. Lokalisering og utforming av veger i drivsnøområder (Location and Design of Roads in Snow-drift Areas).  
H. NOREM, J. G. ANDERSEN. Utforming og plassering av snøskjermer (Design and Location of Snow Fences).  
K. G. FIXDAL. Snøskredoverbygg (Snowsheds).  
H. SOLBERG. Snørydding og snøryddingsutstyr i Troms (Winter Maintenance and Snow Clearing Equipment in Troms County). 59 p. 1975.
50. J. P. G. LOCH. Frost heave mechanism and the role of the thermal regime in heave experiments on Norwegian silty soils.  
K. FLAATE, P. SELNES. Side friction of piles in clay.  
K. FLAATE, T. PREBER. Stability of road embankments in soft clay.  
A. SØRLIE. The effect of fabrics on pavement strength – Plate bearing tests in the laboratory.  
S. L. ALFHEIM, A. SØRLIE. Testing and classification of fabrics for application in road constructions. 48 p. 1977.
51. E. HANSEN. Armering av asfaltdekker (Reinforced bituminous pavements).  
T. THURMANN-MOE, R. WOLD. Halvsåling av asfaltdekker (Resurfacing of bituminous pavements).  
A. GRØNHAUG. Fremtidsperspektiver på fullprofilboring av vegtunneler (Full face boring of road tunnels in crystalline rocks).  
E. REINSLETT. Vegers bæreevne vurdert ut fra maksimal nedbøyning og krumming (Allowable axle load (technically) as determined by maximum deflection and curvature). 52 p. 1978.
52. T. THURMANN-MOE, S. DØRUM. Lyse vegdekker (High luminance road surfaces).  
A. ARNEVIK, K. LEVIK. Erfaringer med bruk av overflatebehandlinger i Norge (Experiences with surface dressings in Norway).  
J. M. JOHANSEN. Vegdekkers jevnhet (Road roughness).  
G. REFSDAL. Vegers bæreevne bestemt ved oppgraving (indeksmetoden) og nedbøyningsmåling. Er metodene gode nok? (Road bearing capacity as decided by deflection measurements and the index method). 44 p. 1980.
53. E. HANSEN, G. REFSDAL, T. THURMANN-MOE. Surfacing for low volume roads in semi arid areas.  
H. MTANGO. Dry compaction of lateritic gravel.  
T. THURMANN-MOE. The Otta-surfacing method. Performance and economy.  
G. REFSDAL. Thermal design of frost proof pavements.  
R. G. DAHLBERG, G. REFSDAL. Polystyrene foam for lightweight road embankments.  
A. SØRLIE. Fabrics in Norwegian road building.  
O. E. RUUD. Hot applied thermoplastic road marking materials.  
R. SÆTERS DAL, G. REFSDAL. Frost protection in building construction. 58 p. 1981.
54. H. ØSTLID. High clay road embankments.  
A. GRØNHAUG. Requirements of geological studies for undersea tunnels.  
K. FLAATE, N. JANBU. Soil exploration in a 500 m deep fjord, Western Norway. 52 p. 1981.
55. K. FLAATE. Cold regions engineering in Norway.  
H. NOREM. Avalanche hazard, evaluation accuracy and use.  
H. NOREM. Increasing traffic safety and regularity in snowstorm periods.  
G. REFSDAL. Bearing capacity survey on the Norwegian road network method and results.  
S. DØRUM, J. M. JOHANSEN. Assessment of asphalt pavement condition for resurfacing decisions.  
T. THURMANN-MOE. The Otta-surfacing method for improved gravel road maintenance.  
R. SÆTERS DAL. Prediction of frost heave of roads.  
A. GRØNHAUG. Low cost road tunnel developments in Norway. 40 p. 1983.
56. R. S. NORDAL. The bearing capacity, a chronic problem in pavement engineering?  
E. REINSLETT. Bearing capacity as a function of pavement deflection and curvature.  
C. ØVERBY. A comparison between Benkelman beam, DCP and Clegg-hammer measurements for pavement strength evaluation.  
R. S. NORDAL. Detection and prediction of seasonal changes of the bearing capacity at the Vormsund test road.  
P. KONOW HANSEN. Norwegian practice with the operation of Dynaflect.  
G. REFSDAL, C-R WARNINGHOFF. Statistical considerations concerning the spacing between measuring points for bearing capacity measurements.  
G. REFSDAL, T. S. THOMASSEN. The use of a data bank for axle load policy planning and strengthening purpose.  
T. S. THOMASSEN, R. EIRUM. Norwegian practices for axle load restrictions in spring thaw. 80 p. 1983.
57. R. S. NORDAL, E. HANSEN (red.). Vormsund forsøksveg. Del 3: Observasjoner og resultater (Vormsund Test Road, Part 3: Observations and Results). 168 p. 1984.
58. R. S. NORDAL, E. HANSEN (red.). The Vormsund Test Road. Part 4: Summary Report. 82 p. 1987.
59. E. LYGREN, T. JØRGENSEN, J. M. JOHANSEN. Vannforurensning fra veger. I. Sammendragsrapport. II. Veiledning for å håndtere de problemer som kan oppstå når en veg kommer i nærheten av drikkevannforekomst (Highway pollution). 48 p. 1985.
60. NRRL, ASPHALT SECTION. Surfacing for low volume roads.  
T. E. FRYDENLUND. Superlight fill materials.  
K. B. PEDERSEN, J. KROKEBORG. Frost insulation in rock tunnels.  
H. ØSTLID. Flexible culverts in snow avalanche protection for roads.  
K. FLAATE. Norwegian fjord crossings why and how.  
H. S. DEIZ. Investigations for subsea tunnels a case history.  
H. BEITNES, O. T. BLINDHEIM. Subsea rock tunnels. Preinvestigation and tunnelling processes. 36 p. 1986.
61. Plastic Foam in Road Embankments:  
T. E. FRYDENLUND. Soft ground problems.  
Ø. MYHRE. EPS – material specifications.  
G. REFSDAL. EPS – design considerations.  
R. AABØE. 13 years of experience with EPS as a lightweight fill material in road embankments.  
G. REFSDAL. Future trends for EPS use.  
Appendix: Case histories 1-12. 60 p. 1987.
62. J. M. JOHANSEN, P. K. SENSTAD. Effects of tire pressures on flexible pavement structures – a literature survey. 148 p. 1992.
63. J. A. JUNCA UBIERNA. The amazing Norwegian subsea road tunnels. 24 p. 1992.



64. A. GRØNHAUG. Miljøtiltak ved vegbygging i bratt terreng (Environmental measures for road construction in mountain slopes). Ø. MYHRE. Skumplast uten skadelige gasser (The phase out of hard CFCs in plastic foam). T. JØRGENSEN. Vurdering av helsefare ved asfaltstøv (Evaluation of health risks of dust from asphalt wear). N. RYGG. Miljømessig vegtilpassing (Environmental road adjustment). 52 p. 1992.
65. C. HAUCK. The effect of fines on the stability of base gravel. A. A. ANDRESEN, N. RYGG. Rotary-pressure sounding 20 years of experience. 24 p. 1992.
66. R. EVENSEN, P. SENSTAD. Distress and damage factors for flexible pavements. 100 p. 1992.
67. STEINMATERIALKOMITEEN. Steinmaterialer (Aggregates). 20 p. 1993.
68. Å. KNUTSON. Frost action in soils. 40 p. 1993.
69. J. VASLESTAD. Stål- og betongelementer i løsmassetunneler (Corrugated steel culvert and precast elements used for cut and cover tunnels). J. VASLESTAD. Støttekonstruksjoner i armert jord (Reinforced soil walls). 56 p. 1993.
70. SINTEF SAMFERDSELSTEKNIKK. Vegbrukers reduserte transportkostnader ved opphevelse av telerestriksjoner (Reduced transportation costs for road user when lifting axle load restrictions during spring thaw period). 144 p. 1993.
71. R. Evensen, E. Wulvik. Beregning av forsterkningsbehov basert på tilstandsvurderinger – analyse av riks- og fylkesvegnettet i Akershus (Estimating the need of strengthening from road performance data). 112 p. 1994.
72. Fjellbolting (Rockbolting). 124 p. 1994.
73. T. BÆKKEN, T. JØRGENSEN. Vannforurensning fra veg – langtidseffekter (Highway pollution – long term effect on water quality). 64 p. 1994.
74. J. VASLESTAD. Load reduction on buried rigid pipes. J. VASLESTAD, T. H. JOHANSEN, W. HOLM. Load reduction on rigid culverts beneath high fills, long-term behaviour. J. VASLESTAD. Long-term behaviour of flexible large-span culverts. 68 p. 1994.
75. P. SENSTAD. Sluttrapport for etatsatsingsområdet «Bedre utnyttelse av vegens bæreevne» («Better utilization of the bearing capacity of roads, final report»). 48 p. 1994.
76. F. FREDRIKSEN, G. HASLE, R. AABØE. Miljøtunnel i Borre kommune (Environmental tunnel in Borre Municipality). F. FREDRIKSEN, F. OSET. GEOPLOT – dak-basert presentasjon av grunnundersøkelser (GEOPLOT – CAD-based presentation of geotechnical data). 48 p. 1994.
77. R. KOMPEN. Bruk av glideforskaling til brusøyler og -tårn (Use of slipform for bridge columns and towers). 16 p. 1995.
78. R. KOMPEN. Nye regler for sikring av overdekning (New practice for ensuring cover). R. KOMPEN, G. LIESTØL. Spesifikasjoner for sikring av armeringens overdekning (Specifications for ensuring cover for reinforcement). 40 p. 1995.
79. The 4th international conference on the «Bearing capacity of roads and airfields» – papers from the Norwegian Road Research Laboratory. 96 p. 1995.
80. W. ELKEY, E. J. SELLEVOLD. Electrical resistivity of concrete. 36 p. 1995.
81. Å. KNUTSON. Stability analysis for road construction. 48 p. 1995.
82. A. ARNEVIK, E. WULVIK. Erfaringer med SPS-kontrakter for asfaltering i Akershus (Experiences with wear-guaranteed asphalt contracts on high volume roads in Akershus county). 28 p. 1996.
83. Sluttrapport for etatsatsingsområdet «Teknisk utvikling innen bru- og tunnelbygging» («Technical development – bridge and tunnel construction, final report»). 20 p. 1996.
84. OFU Gimsøystraumen bru. Sluttrapport «Prøvere-parasjon og produktutvikling» («Trail repairs and product development, final report»). 156 p. 1997.
85. OFU Gimsøystramen bru. Sluttrapport «Klimapåkjenning og tilstandsvurdering» («Climatic loads and condition assessment, final report»). 248 p. 1998.
86. OFU Gimsøystraumen bru. Sluttrapport «Instrumentering, dokumentasjon og verifikasjon» («Instrumentation, documentation and verification, final report») 100 p. 1998.
87. OFU Gimsøystraumen bru. anbefalinger for inspeksjon, reparasjon og overflatebehandling av kystbruer i betong (Recommendations for inspection, repair and surface treatment of coastal concrete bridges). 112 p. 1998.
88. OFU Gimsøystraumen bru. anbefalinger for instrumentert korrosjonsovervåkning av kystbruer i betong. (Recommendations for instrumental corrosion monitoring of coastal concrete bridges). 60 p. 1998
89. OFU Gimsøystraumen bru. Hovedresultater og oversikt over slutt-dokumentasjon (Main result and overview of project reports). 24 p. 1998.
90. J. KROKEBORG. Sluttrapport for Veg-grepsprosjektet «Veggrep på vinterveg» («Studded tyres and public health, final report»). 52 p. 1998.
91. A. GRØNHAUG. Tunnelkledinger (Linings for water and frost protection of road tunnels). 68 p. 1998.
92. J. K. LOFTHAUG, J. MYRE, F. H. SKAARDAL, R. TELLE. Asfaltutviklingsprosjektet i Telemark (Cold mix project in Telemark). 68 p. 1998.
93. C. ØVERBY. A guide to the use of Otta Seals. 52 p. 1999.
94. I. STORÅS et al.: Prosjektet HMS – sprøytebetong (Full-scale testing of alkali-free accelerators). 64 p. 1999.
95. E. WULVIK, O. SIMONSEN, J. M. JOHANSEN, R. EVENSEN, B. GREGER. Funksjonskontrakt for lavtrafikkveg: Rv 169, Stensrud-Midtskog, Akershus, 1994–1999 (Performance-contract for the low traffic road Rv 169). 40 p. 2000.
96. Estetisk utforming av vegtunneler (Aesthetic design of road tunnels). 64 p. 2000.
97. K. I. DAVIK, H. BUVIK. Samfunnstjenlige vegtunneler 1998–2001 (Tunnels for the citizen, final report). Sluttrapport. 94 p. 2001.
98. K. MELBY et al. Subsea road tunnels in Norway. 28 p. 2002.
99. J. VASLESTAD. Jordnagling (Soil nailing). 52 p. 2002.
100. T. E. FRYDENLUND, R. AABØE et al. Lightweight filling materials for road construction. 56 p. 2002.
101. A. PALMSTRØM, B. NILSEN, K. BERGE PEDERSEN, L. GRUNDT. Miljø- og samfunnstjenlige tunneler; Riktig omfang av undersøkelser for berganlegg (Appropriate amount of investigations for underground rock constructions). 134 p. 2003.
102. J. S. RØNNING. Miljø og samfunnstjenlige tunneler; Delprosjekt A, Forundersøkelser – Sluttrapport (New geological and geophysical methods for tunnel investigations). 68 p. 2003.
103. K. KARLSRUD, L. ERIKSTAD, P. SNILSBERG. Undersøkelser og krav til innlekkasje for å ivareta ytre miljø (Requirements concerning tunnel leakages and environmental aspects). 100 p. 2003.
104. B. H. KLÜVER, A. KVEEN. Berginjeksjon i praksis (Practical pre-grouting). 68 p. 2004.
105. A. KVEEN, M. LINDSTRØM. Miljø- og samfunnstjenlige tunneler – Sluttrapport (Tunnel investigations and ground water control. Final report). 74 p. 2004.

# Teknologiavdelingen

## Organisasjon

Teknologiavdelingen ble etablert 1. januar 2003. Avdelingen består av tre seksjoner i Oslo og én i Trondheim:

SEKSJON FOR GEO- OG TUNNELTEKNIKK SEKSJON FOR MATERIALTEKNIKK SEKSJON FOR BRUTEKNIKK ADMINISTRASJON  Telefon 22 07 35 00	Postadresse: Statens vegvesen Vegdirektoratet Teknologiavdelingen Postboks 8142 Dep 0033 Oslo	 Brynsengfarete 6A - Oslo
VEG- OG TRAFIKKFAGLIG SENTER  Telefon 73 95 46 30	Postadresse: Statens vegvesen Vegdirektoratet Teknologiavdelingen Postboks 8142 Dep 0033 Oslo	 Abels gate 5 - Trondheim

## Oppgaver

Hovedoppgavene er å drive forsknings- og utviklingsarbeid og være rådgiver innenfor avdelingens fagområder. I arbeidet inngår kurs, opplæringsvirksomhet og rekruttering.

Besøksadresse i Oslo: Brynsengfarete 6 a  
Besøksadresse i Trondheim: Abels gate 5.  
e-post: [firmapost@vegvesen.no](mailto:firmapost@vegvesen.no)

[www.vegvesen.no](http://www.vegvesen.no)



## Statens vegvesen

Returadresse:  
Teknologiavdelingen  
Postboks 8142 Dep  
0033 Oslo

«Miljø- og samfunnstjenlige tunneler» er et omfattende bransjeprojekt som har pågått i perioden 2000 – 2003, støttet av Norges forskningsråd. Representanter fra byggherre, entreprenører, konsulenter, forsknings- og utdanningsinstitusjoner har sammen drevet prosjektet med felles målsetting om å heve kompetansen for påvisning og håndtering av svakhetssoner og grunnvann ved tunneldrift.

Resultatene er sammenfattet i følgende publikasjoner:

Publikasjon nr. 101:

*Riktig omfang av undersøkelser for berganlegg*

Publikasjon nr. 102:

*Delprosjekt A, Forundersøkelser – Sluttrapport*

Publikasjon nr. 103:

*Undersøkelser og krav til innlekkasje for å ivareta ytre miljø*

Publikasjon nr. 104:

*Berginjeksjon i praksis*

Publikasjon nr. 105:

*Miljø- og samfunnstjenlige tunneler – Sluttrapport*