

Vurdering av krav og tiltak for å unngå uønsket påvirkning på grunnvann og kulturminner

Dato: 01.07.2026

Dette dokumentet er et internt notat som skal gi grunnlag for videre vurderinger og anbefalinger. Notatet er en del av arbeidet med fase 4 for reguleringsplanene for Bybanen og hovedsykkelrute mellom Bergen sentrum og Sandviken. Reguleringsplanene er en del av Bybanen mellom sentrum og Åsane (byggetrinn 5. Reguleringsplanarbeidet er i en pågående prosess, og notatet gir et bilde av løsninger og vurderinger på det gitte tidspunkt. Både utarbeiding av løsninger og vurderinger av disse er en del av en arbeidsprosess der løsningene kan bli endret underveis, og notatene vil ikke nødvendigvis oppdateres.

Sammendrag

Dette notatet vurderer krav og tiltak for å unngå uønsket påvirkning på grunnvann og fredede kulturminner ved bygging av bybanetunnel og underjordisk holdeplass på strekningen Heggebakken – Sandviken, som er del av ny reguleringsplan for bybanetrasé mellom Kaigaten og Sandviken.

Tunnelen fra Heggebakken til Sjøgaten omfatter flere tunnelløp, med underjordisk holdeplass ved Sverresborg. Tunnelens plassering påvirkes bl.a. av eksisterende fjellanlegg, i tillegg til forutsetninger for plassering av holdeplassen og publikumsinnganger.

Ved bygging av tunnelene vil innlekkasje av grunnvann kunne medføre uønsket påvirkning på det fredete kulturminnet Middelalderbyen Bergen. Det må forventes meget strenge tettekrav, i størrelsesorden 0-5 l/min/100 m, for å unngå uakseptabel grunnvannssenkning. Det anbefales å planlegge med systematisk og omfattende forinjeksjon av alle deler av tunnelanlegget, inkludert forskjæringer og sjakt ved Fredens bolig. For den søndre delen av banetunnelen, nærmest Vågsbunnen og Hanseatisk museum, er det risiko for at man ikke klarer å oppnå tett nok tunnel, selv med omfattende forinjeksjon. På denne strekningen anbefales det derfor å planlegge med behov for vanntett udrenert utstøping av tunnelprofilen.

Det må etableres et program for overvåkning av grunnvannsstand. Programmet bør inkludere poretryksmålere og fjellbrønner nær tunnelen, samt setningsmålinger, for å sikre at grunnvannsnivå og setningsrisiko kontrolleres under og etter bygging.

Versjon	Dato	Beskrivelse	Utarbeidet	Fagkontrollert	Godkjent
C01	2026-07-01	For kommentar	HaK	KT	IOv

Dette dokumentet er utarbeidet av Norconsult som del av det oppdraget som dokumentet omhandler. Opphavsretten tilhører Norconsult. Dokumentet må bare benyttes til det formål som oppdragsavtalen beskriver, og må ikke kopieres eller gjøres tilgjengelig på annen måte eller i større utstrekning enn formålet tilsier.

Innhold

1	Innledning	4
2	Oppsummering av hydrogeologiske vurderinger	4
2.1	Grunnforhold og grunnvannssituasjonen i området	4
2.2	Gjeldende krav/akseptkriterier	6
2.3	Resultat av utført grunnvannsmodellering	7
3	Tiltak for å unngå uønsket grunnvannssenkning	10
3.1	Introduksjon	10
3.2	Tetting av tunneler ved forinjeksjon	10
3.3	Vanntett utstøping	12
3.4	Vanninfiltrasjon	14
3.5	Tetting av forskjæringer og byggegroper	15
3.6	Tettestrategi	15
4	Tiltak for å overvåke og dokumentere krav	17
5	Oppsummering og anbefaling	17
6	Referanser	19

1 Innledning

I arbeidet med teknisk forprosjekt for ny reguleringsplan for bybanetrasé mellom Kaigaten og Sandviken, skal det legges til grunn en løsning der banen går inn i tunnel ved Heggebakken og Bergen Katedralskole, og fortsetter i tunnel nordover øst for sentrum og Bryggen til Sjøgaten, rett vest for Sandvikskirken. Det skal anlegges en holdeplass i tunnel øst for Sverresborg, med innganger fra henholdsvis Sandbrogaten i vest og parken Fredens bolig i øst.

Fra tunnelportalen ved Heggebakken går banen med maks fall på 6 % for å krysse under Telenor sitt fjellanlegg og Bane NOR sin jernbanetunnel, og får et lavbrekk rundt profil 900 (ca. kote -10), om lag 200 meter inn i tunnelen fra påhugget. Hensynet til de to eksisterende fjellanleggene gir en binding for beliggenheten til bybanetraseen i dette området.

Banen vil gå i et felles tunnellop for dobbeltspor med ca. tunneltverrsnitt 74 m² sør og nord for Sverresborg holdeplass. Inn mot holdeplassen fra sør splittes sporene i to enkeltsporstunneler, før de kommer ut i et stort bergrom for holdeplassen. Bergrommet vil få spennvidde ca. 23 meter og høyde fra ca. 11 meter til ca. 16 meter der adkomsttunnelene kommer inn. Rett nord for holdeplassen planlegges det et anlegg med vendespor, som medfører en forlengelse av holdeplassens store fjellhall. I tillegg skal det etableres en stor sjakt for adkomst og tekniske anlegg ved Fredens bolig, samt en kort anleggstunnel. Området ved holdeplassen vil derfor innebære etablering av flere tunneler og bergrom.

Ved bygging av tunnelene inkludert forskjæringer og sjakt i berg, vil innlekkasje av grunnvann kunne medføre uønsket påvirkning på grunnvannsnivået i berg og løsmasser, som igjen vil kunne påvirke fredede kulturlag i grunnen og medføre setninger på bebyggelse. Dette notatet oppsummerer vurderinger av hvilke krav som gjelder med tanke på akseptabel grunnvannssenkning, tettekrav til tunnelene og anbefalte tiltak.

2 Oppsummering av hydrogeologiske vurderinger

2.1 Grunnforhold og grunnvannssituasjonen i området

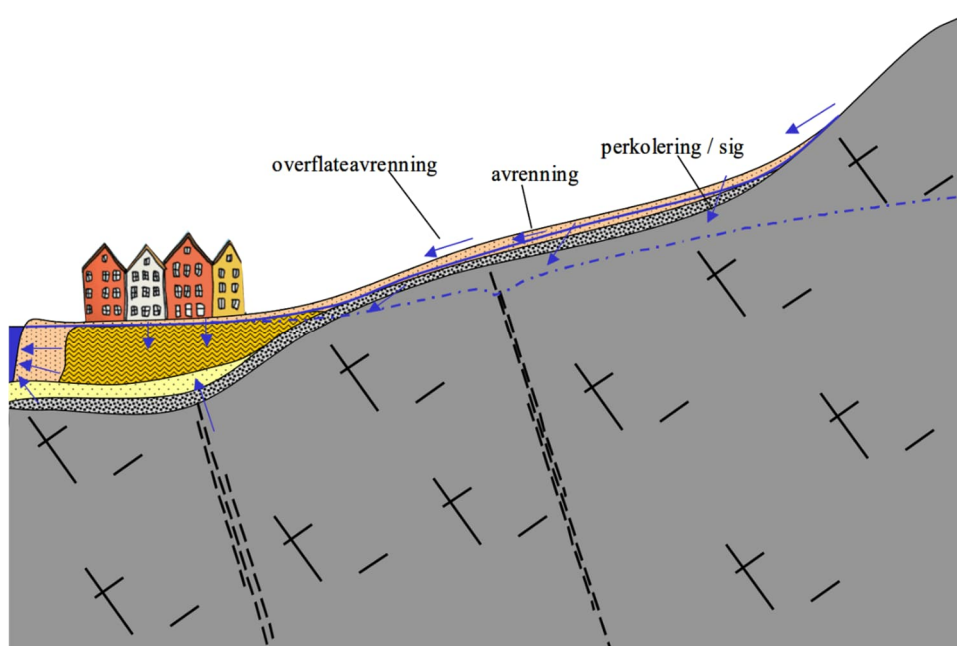
Grunnvannssituasjonen i prosjektområdet er påvirket av nedbørsinfiltrasjon, havnivå, terreng, løsmasser og berggrunn.

Terrenget i prosjektområdet heller fra Fløyfjellet (400 m.o.h.) i nordøst ned mot Vågen (havnivå) i sørvest, slik at Bybane-traséen går tilnærmet på tvers av terrenghelningen. Ifølge NGUs løsmassekart er området langs Bryggen og Vågsbunnen i sørvest preget av antropogene masser (fyllmasser/kulturlag), mens de høyere liggende områdene i nordøst består av bart fjell stedvis med tynt morenedekke.

Berggrunnsgeologien inngår i de såkalte Bergensbuene, med bergartsgrenser orientert tilnærmet NV-SØ-retning og fall mot nordøst. Bergartene består av amfibolitt og granatglimmerskifer nærmest Vågen, og øyegneis og kvartsitt lengre mot nordøst. Det er antatt at enkelte svakhetssoner opptrer langs med og/eller med samme orientering som bergartsgrensene.

Grunnvannsnydannelsen påvirkes videre av nedbør og infiltrasjon til grunnen, hvor infiltrasjonen påvirkes av grunnens permeabilitet og terrenghelning. Permeabilitet (hydraulisk ledningsevne) varierer betydelig i både berg og løsmasser. I tillegg til opptredende grunnforhold påvirkes også grunnvannets strømming av eksisterende tunneler og bergrom.

Figur 2-1 viser en forenklet skisse av situasjonen i snitt, fra [1].

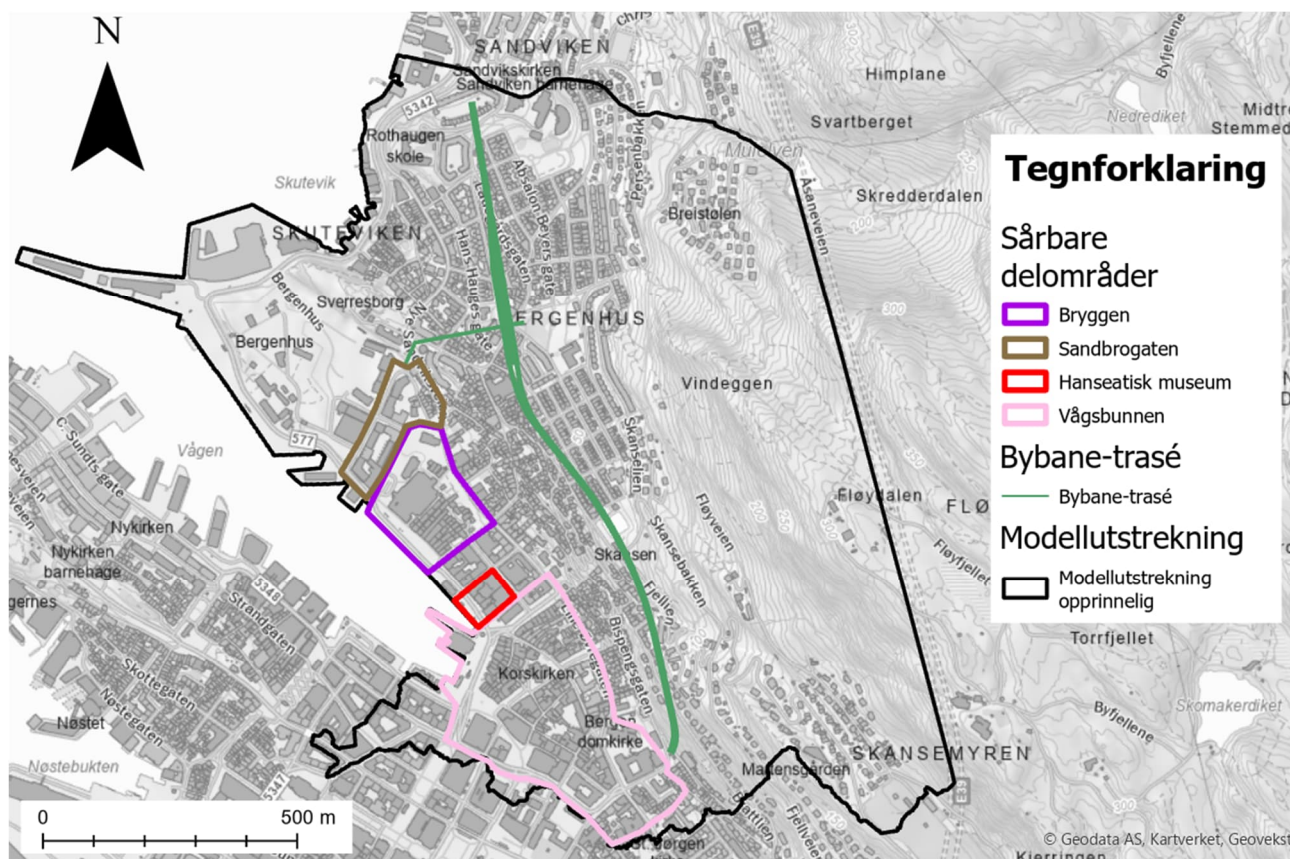


Figur 2-1: Konseptuell, regional hydrogeologisk modell visualisert i et tverrprofil ved Bryggen, sett fra sør. Fra [1].

Som figuren over viser følger grunnvannstrømningen hovedsakelig topografien fra Fløyfjellet i nordøst til fjorden (Vågen) i sørvest. Grunnvannet renner hovedsakelig i sprekker i berg i de høyereliggende områdene i nordøst, og renner ut til fjorden via porer i naturlige og antropogene løsmasser i sørvest. Grunnvannet mates fra nedbør, via perkolasjon til sprekker i berg i øst, og via infiltrasjon av nedbør, overflateavrenning, grunnvannsstrømning i løsmasser (avrenning) og berg til områdene ved Bryggen i sørvest.

Informasjon om grunnvannsstand finnes fra et stort antall etablerte brønner i berg, piezometere i løsmasser, samt enkeltmålinger fra boring av energibrønner rapportert inn til NGU (GRANADA). Ut fra foreliggende data er det utarbeidet et grunnvannskotekart over området. Dette er nærmere beskrevet og vist i rapport fra grunnvannsmodellering [2]. Grunnvannskotekartet vises også som en flate i prosjektets innsynsmodell. Grunnvannsnivået over traseen varierer fra ca. 6-7 m over tunnelen rett innenfor påhugget i Heggebakken til ca. 50 meter over tunnelen ved ca. profil 1200. Videre nordover synker nivået til ca. 20 meter over hengen ved mesanin i holdeplassen. Ut mot påhugget i Sjøgaten synker grunnvannsnivået til 5-10 meter over tunnelen. Langs hele tunneltraséen er grunnvannsstanden tolket til å ligge i berg eller i overgangen mellom berg og løsmasser, det vil si at løsmasser over traseen forventes i stor grad å være drenert. Det kan ikke utelukkes lokalt hengende grunnvannsspeil i enkelte soner med løsmasser. I områdene vest for tunneltraséen ned mot Vågen, Bryggen og Skuteviken står grunnvannet opp i løsmassene.

Basert på tidligere konseptuelle modeller, numeriske modeller samt resultater fra utførte grunnundersøkelser, er det etablert en numerisk grunnvannsmodell for området sentrum – Sandviken, se Figur 2-2. Modellen er benyttet til å simulere potensiell grunnvannssenkning i området ved ulike mengder innlekkasje til tunnelene, og ut fra dette vurdere hvilke tetthetskrav som bør stilles for å unngå uønsket grunnvannssenkning. Modellens oppbygning og resultater beskrives i en egen rapport [2].



Figur 2-2: Utstrekning av den etablerte grunnvannsmodellen, og inndeling i sårbare delområder innenfor Middelalderbyen Bergen.

2.2 Gjeldende krav/akseptkriterier

Med de planlagte tunnelene for Bybanen vil det være risiko for grunnvannssenkning innenfor det automatisk fredete kulturminnet *Middelalderbyen Bergen*. Det er tidligere påvist at kulturlag, bestående av mye organisk materiale, og bygninger innenfor Middelalderbyen er meget sensitive for grunnvannssenkning, og det er allerede pågående setninger og skader på bebyggelse i området. Ved tilførsel av oksygen kan det organiske materialet i kulturlagene gå i forråtnelse og komprimeres kraftig. Dette gir ikke bare et tap av kulturminneverdier som ikke kan erstattes, men kan også føre til at grunnen som deler av byen er bygget på får setninger.

Fra den godkjente reguleringsplanen for Bybanens byggetrinn 5, sentrum – Vågsbotn, delstrekning 1 Kaigaten – Sandbrogaten (DS1) gjelder følgende reguleringsbestemmelser:

Fellesbestemmelser §2.2 (gjelder det automatisk fredete kulturminnet «Middelalderbyen Bergen»):

§2.2.3. Det skal etableres et miljøovervåkingsprogram i samarbeid med kulturmiljømyndighetene minst ett år før, under og 10 år etter igangsetting av anleggsfasen.

§2.2.9. Tiltak som kan medføre økt risiko for setninger i grunnen, f.eks. inngrep i bakken og tiltak som kan endre grunnvannsnivået, er ikke tillatt innenfor planområdet. Kommunen kan likevel godkjenne tiltak dersom det fremlegges dokumentasjon for at tiltaket ikke medfører setningsrisiko og det foreligger tillatelse fra kulturmiljømyndighetene, der tiltaket medfører krav om dette.

Det kan derfor forventes strenge krav til hva som kan aksepteres av grunnvannspåvirkning, men hittil har ikke kulturmiljømyndigheter villet uttale seg om hvilke krav de vil sette. På oppdrag fra Bergen kommune har NGU ved Hans de Beer utarbeidet et notat med en faglig vurdering av risikoene ved grunnvannssenkning og anbefalinger til akseptkriterier [3].

NGU anbefaler en konservativ og risikobasert tilnærming til grunnvannspåvirkning. Anbefalingene er basert på risiko for eventuelle *permanente* endringer som følge av lekkasje til tunnelene. I anleggsfasen kan midlertidige og lokalt større grunnvannssenkninger i enkelte tilfeller vurderes som akseptable, forutsatt tett overvåkning, kort varighet og dokumentert kontroll med risiko for setninger og skade på kulturlag. Midlertidige avbøtende tiltak bør vurderes dersom forventet påvirkning i anleggsfasen har en større varighet enn det som forekommer i naturlig tilstand.

Tabellen under viser hvilke akseptkriterier som Norconsult forventer vil bli gjeldende, basert på NGUs foreløpig anbefalte akseptkriterier og bestemmelser i gjeldende reguleringsplan. Det er tatt utgangspunkt i disse kravene ved vurdering av tiltak som er beskrevet videre i notatet.

Tabell 2-1: Forventede akseptkriterier for grunnvannssenkning i kulturlag innenfor området Middelalderbyen Bergen.

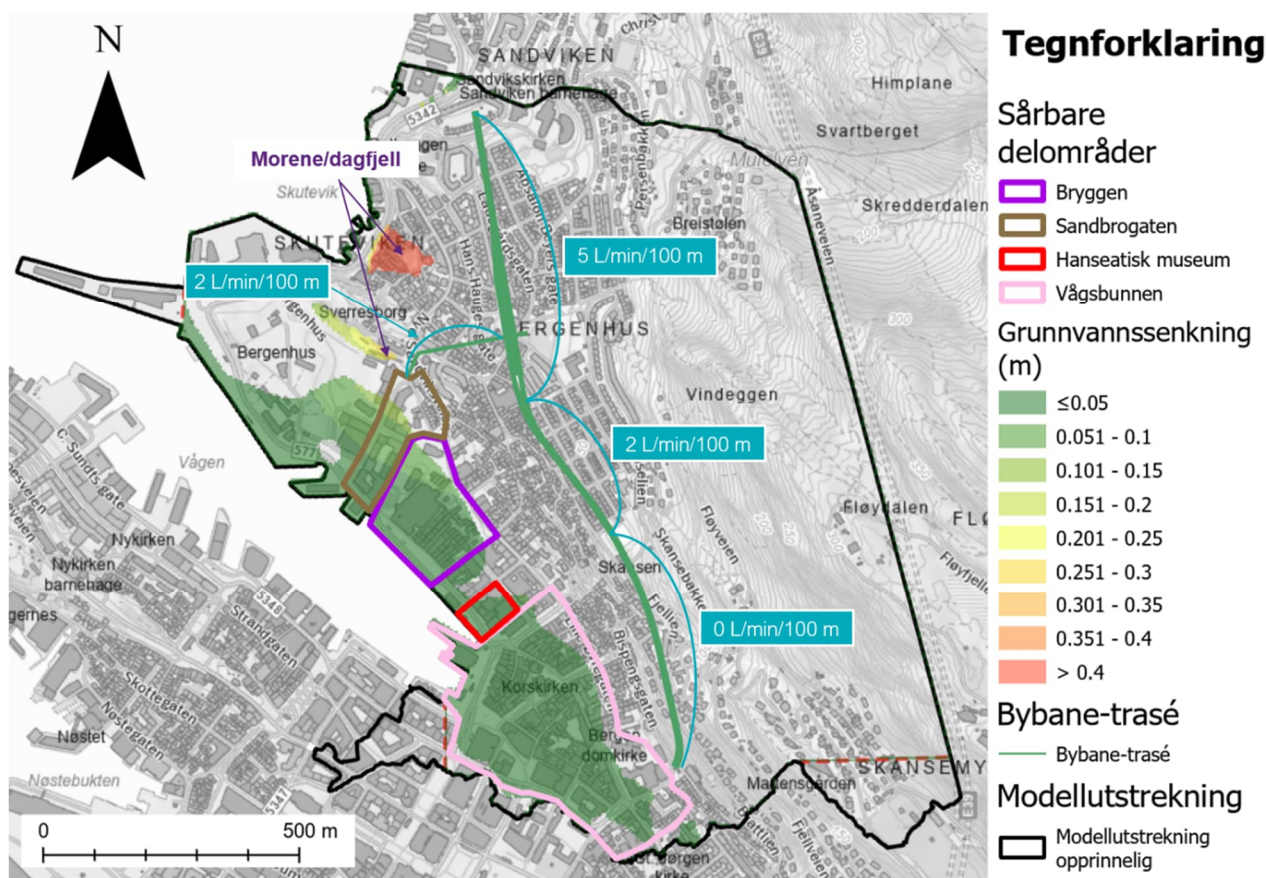
Delområde	Akseptkriterium, grunnvannssenkning	Kommentar
Bryggen	Maks. 10 cm	Dreneringstiltak og vanninfiltrasjonsanlegg er i drift i dette området.
Hanseatisk museum	Ingen permanent senkning aksepteres	Drensgrøft for å holde grunnvannsstand mest mulig stabil er etablert i fronten av bebyggelsen.
Vågsbunnen	Ingen permanent senkning aksepteres	Svært varierende grunnforhold, eksisterende setningsproblematikk
Øvrige deler av influensområdet (inkludert Sandbrogaten)	Vurderes områdevis	

Faren for skader på kulturlag og eventuelt setninger på bebyggelse er begrenset til områdene der kulturlag forekommer under dagens grunnvannsnivå. Det er ikke kartlagt andre setningsømfintlige løsmasser innenfor tunnelens influensområde. Dette medfører f.eks. at løsmassene i Skuteviken er vurdert som ikke setningssensitive.

2.3 Resultat av utført grunnvannsmodellering

Den numeriske grunnvannsmodellen viser at det må stilles svært strenge krav til tetthet i tunnelene for å overholde de foreslåtte akseptkriteriene for maksimal grunnvannssenkning innenfor Middelalderbyen, der det forekommer kulturlag under grunnvannsstand (i vannmettet sone). Figur 2-3 viser resultatet av en simulering i modellen, der det er analysert hvilken grunnvannssenkning som kan forventes i løsmassene

ved innlekkasje til tunnelene på 0 L/min/100 m (banetunnel fra Heggebakken i sør fram til Skansendammen), ca. 2 l/min/100 meter (banetunnel fra Skansendammen til holdeplassområdet, samt anleggs- og adkomsttunnel) og ca. 5 l/min/100 meter i bergrom for Sverresborg holdeplass, vendespor og banetunnel nord for holdeplass. Ved disse lekkasjeratene kan det forventes at akseptkriteriet om maksimalt 10 cm grunnvannssenkning ved Bryggen vil overholdes. I områdene ved Hanseatisk museum og i Vågsbunnen estimeres en grunnvannssenkning på ≤ 5 cm, noe som medregnet modellens usikkerhet må kunne regnes som en tilnærmet neglisjerbar grunnvannspåvirkning. Modellen viser videre at senkning av grunnvannet i berg nær tunnelen må begrenses til maksimalt 1 meter på strekningen Heggebakken-Skansendammen.



Figur 2-3: Resultat fra numerisk grunnvannsmodell som viser forventet grunnvannssenkning i løsmasser ved simulering av scenario med innlekkasje på 0 L/min/100 m (banetunnel sør for Skansendammen), 2 L/min/100 m (banetunnel Skansendammen – Sverresborg holdeplass, samt anleggs- og adkomsttunnel) og 5 L/min/100 m (holdeplass, vendesløyfe og banetunnel nord for vendesløyfe). I områdene uten farge ligger dagens grunnvannsnivå i berg, dvs. løsmassene er allerede drenert og det er ikke fare for setninger i disse massene.

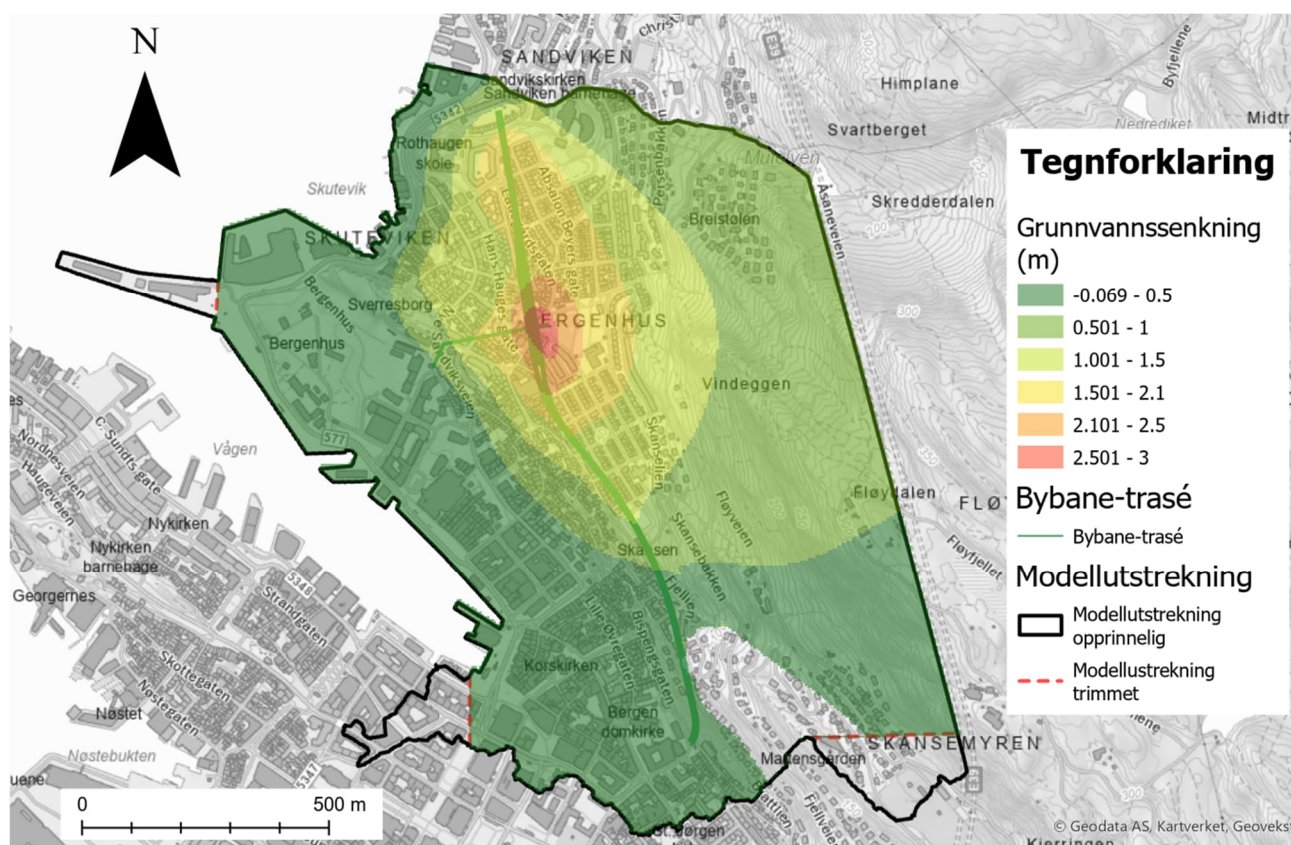
De små akseptable endringene i grunnvannsnivå (i størrelsesorden 5-10 cm eller mindre) gjør det utfordrende å overvåke situasjonen i anleggsfasen. Tetttiltak bør derfor styres etter overvåkningsbrønner i berg rett over/ved tunnelen, der grunnvannssenkningen vil kunne registreres først. Foreslåtte krav til maksimal tillatt senkning av grunnvann i berg nær tunnelen er angitt i Tabell 2-2. Der det er angitt et intervall, representerer dette forskjeller i krav til maksimal grunnvannssenkning i ulike deler av tunnelens influensområde. Som det fremgår av Figur 2-4 er kravene mindre strenge målt nær tunnelen ved holdeplass Sverresborg, mens det må stilles strengere krav til senkning av grunnvann i berg nærmere Bryggen og Vågsbunnen.

Tabell 2-2: Forslag til tettekrav og maksimalt tillatt grunnvannssenkning i berg

Tunnelstrekning	Profil fra -til	Tettekrav (l/min/100 m)	Maks grunnvannssenkning i berg* (m)
Forskjæring Heggebakken	-	-	0,1-1
Banetunnel	680 – 1200	< 1	0,1-1
Banetunnel	1200 – 1500	2	1-2
Sverresborg holdeplass og vendeområde, inkl. sjakt Fredens bolig	1500 – 1850	5	2-3**
Adkomst-/anleggstunnel	-	2	0,5-2,5**
Banetunnel	1850 – 2055	5	1-2,5
Forskjæring Sandbrogaten	-	-	0,5-1
Forskjæring Sjøgaten	-	-	1-1,5

* Målt i overvåkingsbrønner i berg langs aktuelle tunnelstrekninger. Kravene baserer seg på estimert senkning i berg ved tunneltraséen som vist i Figur 2-4.

** Kan være gjenstand for revisjon dersom spesifikke akseptkriterier for Sandbrogaten tilsier dette



Figur 2-4: Simulert senkning i berg (lag 30 i grunnvannsmodellen) ved innlekkasjer som angitt i kolonne «Tettekrav» i Tabell 2-2.

3 Tiltak for å unngå uønsket grunnvannssenkning

3.1 Introduksjon

I sårbare områder med setningsrisiko, med typisk tettekrav 3-7 l/min/100 m, har det vært vanlig praksis i Norge å legge til grunn tunneldriving med systematisk, sementbasert forinjeksjon med høye injeksjonstrykk. Er det mindre sårbare omgivelser, og dermed mindre strenge krav til tetting, vil det normalt være tilstrekkelig å utføre behovsprøvd injeksjon basert på lekkasjemåling fra sondérhull foran stuff. Ved behovsprøvd forinjeksjon er det en risiko for at man ikke fanger opp alle vannførende sprekker på sondérhullene foran stuff, og dermed må regne med noe restlekkasje til tunnelen. Å forsøke å tette lekkasjer bak stuff, såkalt etterinjeksjon, vil sjelden bli vellykket da lekkasjene har en tendens til å flytte seg til andre områder langs tunnelen.

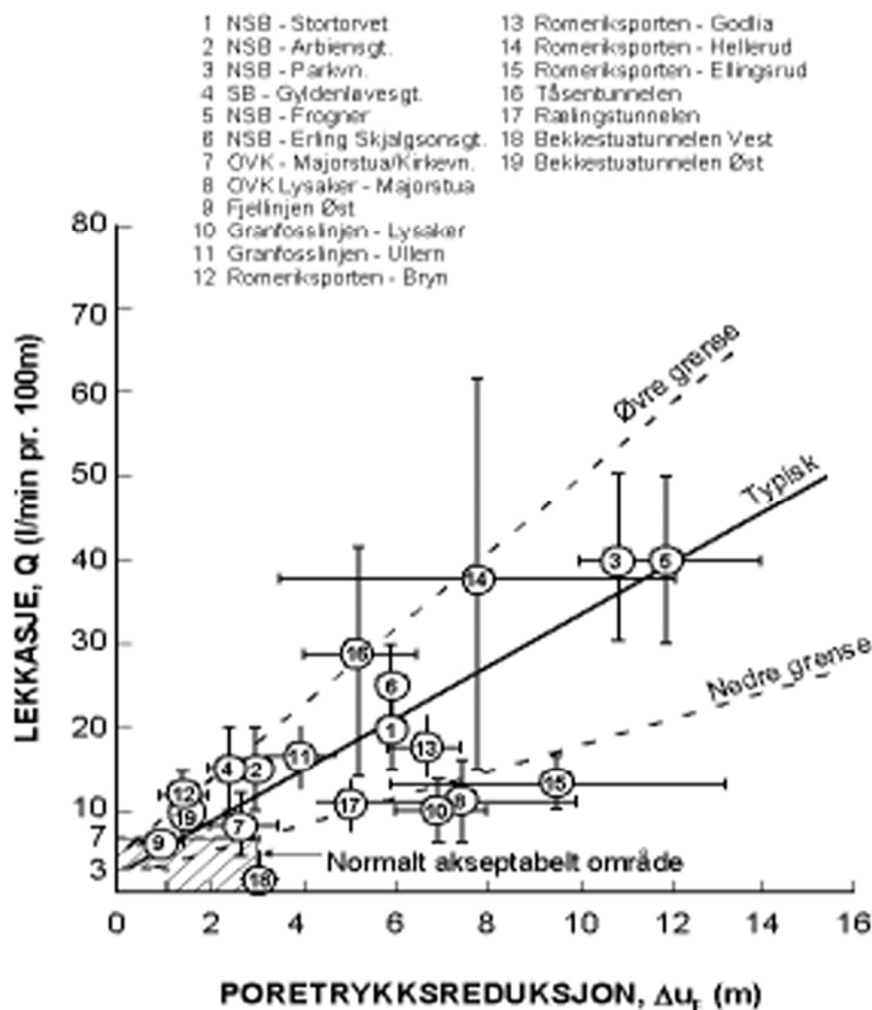
Ved ekstremt strenge tettekrav, typisk ≤ 3 l/min/100 m, må man vurdere om forinjeksjon vil være tilstrekkelig alene til å gi tett nok tunnel, eller om det også må suppleres med andre tiltak. Dette kan være etablering av vanntett, udrenert utstøping av tunnelprofilen og/eller vanninfiltrasjon. For norske tunnelprosjekter kjenner Norconsult kun til at det er stilt så strenge tettekrav til tunneler i Oslo-området, der man har svært setningsømfintlige marine leiravsetninger med varierende mektighet opptil 80 meter.

3.2 Tetting av tunneler ved forinjeksjon

Den vanligste metoden for å tette tunneler drevet ved boring og sprengning, er forinjeksjon av bergmassen foran stuff. Det bores et stort antall hull langs tunnelkonturen på stuff, typisk 21-24 meter lange, som injiseres med sementbasert masse med trykk. Injeksjonsmassen trenger inn i sprekker i bergmassen og tetter disse. Hvor omfattende injeksjonen må være, avhenger av bergmassens karakter og kravene til tetthet. Ved strenge krav til tetthet legges det vanligvis opp til systematisk forinjeksjon gjennom hele tunnelen, liten avstand mellom injeksjonshullene (0,5-1 m), stor overlap mellom injeksjonsskjermene og boring av kontrollhull etter hver skjerm før tunneldriving kan fortsette. Ved svært strenge tettekrav kan det også være behov for doble og /eller oppdelte skjærmer, og eventuelt bruk av andre tettemidler som supplement (f.eks. kolloidal silika).

Hvor tett tunnel man erfaringsmessig kan oppnå med systematisk forinjeksjon avhenger av flere faktorer.

I bransjeprosjektet Miljø- og samfunnstjenlige tunneler konkluderer [4] med at potensialet for lekkasje samt hva som kreves for å oppnå en gitt tetthet er sterkt avhengig av bergartstypen, grad og type av oppsprekking til bergmassen, samt type injeksjonsmasse og anvendt injeksjonsteknikk. Prosjektet fant også en klar sammenheng mellom lekkasjeverdier og poretryksreduksjon, Δu_F , målt i dyprenner rett over tunnelen, som vist i Figur 3-1. Det bemerkes imidlertid at det ikke er sett på prosjekter med lavere oppnådd poretryksreduksjon rett over tunneler enn ca. 1 meter. En innlekkasje (Q) på 1-3 l/min/100 m tunnel innebærer i praksis at det knapt kan være noen synlige drypp eller rennende lekkasjer i tunnelen.



Figur 3-1: Sammenheng mellom lekkasje og poretryksreduksjon ved fjell rett over tunnelanlegg [4].

I et nyere arbeid har Langford et al. [5] sett på oppnådd tetthet av bergmasse versus tetteinnsats i 44 tunneler bygget i tidsperioden 1975-2020, hovedsakelig i Oslo-området. En sammenstilling av dataene viser i utgangspunktet ingen klar korrelasjon mellom bergartstype, tetteinnsats og oppnådd hydraulisk konduktivitet i injisert sone. En sannsynlig grunn til dette kan være at bergmassens hydrauliske konduktivitet, K_i , er tilbakeregnet basert på innlekkasjemålinger over lange tunnelstrekninger i stedet for måling av innlekkasje innenfor spesifikke geologiske strukturer. Det indikeres imidlertid at omfanget av injeksjonsboring har vært større i tunneler i skifer og kalkstein, uten at man har oppnådd tettere injisert sone rundt tunnelen sammenlignet med tunneler i størkningsbergarter. Skiferbergarter har typisk lavere hydraulisk konduktivitet med diskontinuerlige sprekker og leirfylte sprekker. En slik bergmasse vil kreve mange injeksjonshull for å treffe alle vannførende sprekker og oppnå god effekt av forinjeksjonen. Andre typer bergarter med mer åpne sprekker og høyere hydraulisk konduktivitet kan være mer gunstige for å oppnå god effekt av systematisk forinjeksjon.

Med den norske metoden for utførelse av forinjeksjon kan det være mulig å oppnå en hydraulisk konduktivitet (K_i) i injisert sone på typisk $4\text{--}6 \cdot 10^{-9}$ m/s. De mest vanntette tunnelene undersøkt av Langford

et al. [5] har oppnådd K_i ned mot $1-2 \cdot 10^{-9}$ m/s, og målt innlekkasje i størrelsesorden 1-3 l/min/100 m. Dette er tunneler som ligger i ulike geologi/bergartstyper.

Det finnes lite dokumenterte erfaringer med forinjeksjonsarbeider og målt poretrykksreduksjon fra tunneler i Bergens-området. Fra BT4 har man erfaring fra Årstad-tunnelen, som er en ca. 1,5 km lang bybanetunnel mellom bybanestoppet på Kronstad, Haukeland Sykehus og bybanestoppet i Fløen. Traseen krysser flere bergartsgrenser og svakhetssoner i mylonittisk gneis, kvartsitt/kvartsskifer og amfibol-granat-glimmerskifer. Tunnelen ble drevet under tett bebyggelse med relativt lav overdekning og innlekkasjekrav på 5–10 l/min per 100 m tunnel. Erfaringen var at vannproblemene i hovedsak var knyttet til enkelte lokale svakhetssoner og bergartsgrenser, og at injeksjonsbehovet derfor ble konsentrert til sporadiske injeksjonsskjermer langs traséen. Norconsult har ikke fått tilgang til prosjekterings- eller sluttrapport for tunnelen, og kjenner derfor ikke til grunnlaget for tettekravet eller resultatet av tettearbeidet (total innlekkasje, eventuell målt poretrykksreduksjon).

Med tettekrav ned mot (og under) 1 l/min/100 m og maksimal tillatt grunnvannssenkning i berg over/ved tunnelen under 1 meter, representerer dette krav som er strengere enn i noe annet kjent norsk tunnelprosjekt. Med begrenset erfaring fra tilsvarende tunneler og krav i Bergensområdet, samt nærhet til eksisterende tunneler og bergrom som setter visse begrensninger til utførelse av injeksjon, er det usikkert om det vil være mulig å oppnå tilstrekkelig tett tunnel ved kun forinjeksjon.

3.3 Vanntett utstøping

Vanntett udrenert utstøping av tunneler innebærer at det etableres betongstøp rundt hele tunnelprofilen for å hindre at grunnvann trenger inn i tunnelrommet.

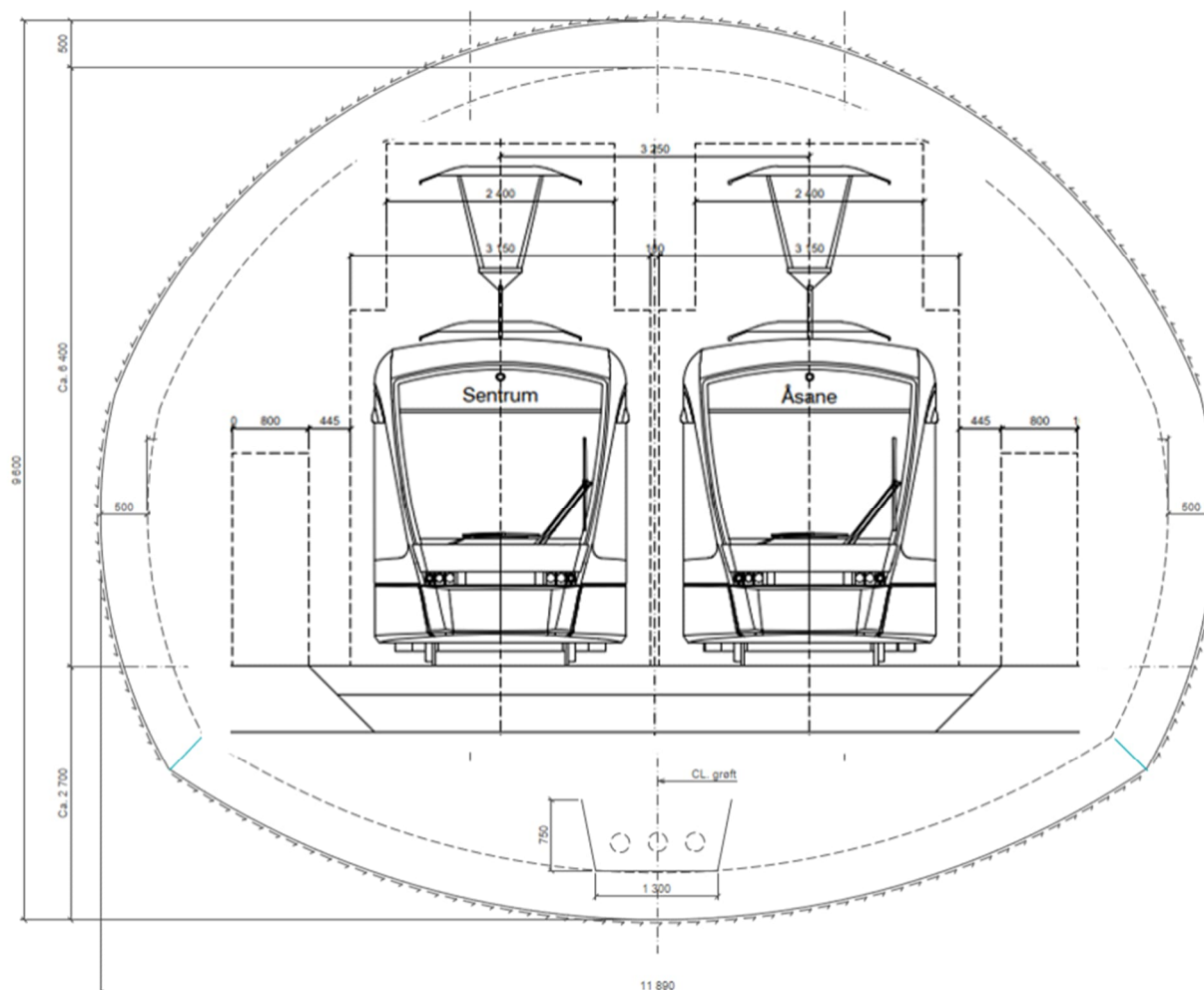
For at utstøpingen skal ha ønsket effekt må:

1. selve konstruksjonen være impermeabel, dvs. unngå radielle lekkasjer gjennom konstruksjonen
2. det etableres endetetting for å forhindre at vann strømmer langs konstruksjonen og ut i «drenert tunnel»
3. utstøpning dekke det området i tunnelen der innlekkasjen er for stor

Etter utsprengning av tunnelen må midlertidig kjørebane på sålen fjernes, vegger og heng avrettes med sprøytebetong, og det monteres heldekkende vanntett membran mellom avrettet overflate og støp.

Tykkelsen på utstøpingen avhenger av størrelse på tunnelen og potensielt vanntrykk. Hvelvet er normalt uarmert.

Figur 3-2 viser prinsipp for hvordan tunnelverrsnittet for Bybanen kan utformes med tilpasning til vanntett udrenert støp. Det bemerkes at skissen kun er et utgangspunkt for å vurdere omtrentlig størrelse på tverrsnittet og antatt tykkelse på støp. Det må utføres beregninger av konstruksjonen for å vurdere hvordan støpen bør utformes med hensyn til forventet opptredende vanntrykk.



Figur 3-2: Prinsipp for normalprofil med vanntett udrenert utstøping. Teoretisk sprengningsareal ca. 91 m².

Prinsippet vist i Figur 3-2 er basert på eksempler fra andre tunnelanlegg med varierende tverrsnitt og dimensjonerende vanntrykk i størrelsesorden 20 – 65 meter. Forventet maksimalt vanntrykk det må dimensjoneres for i bybanetunnelen er ca. 50 meter. Det tas utgangspunkt i en uarmert støp med avrundet profil, som fungerer som en trykkbue. Konstruksjonen vil da ikke ha behov for armering, men sammentrekninger fra svinn og temperatur i tunnelens lengderetning gjør at det vil oppstå riss. Membranen på støpens utside vil hindre lekkasje som følge av opprissing. Ved å benytte lav-varme betong vil herdeprosessen gå sakte, noe som reduserer svinn-tøyninger og svinn-armering vil ikke være nødvendig. Støpe-skjøter kan plasseres i overgangen mellom såle og tunnelbuen. Det antas at konstruksjonen kan støpes i etapper på 5-10 meter. Det må etableres vanntette fuger mellom støpe-skjøtene i tunnelens lengderetning.

Når en vanntett utstøping etableres, vil vanntrykket nærmest tunnelkonturen gå fra 0 bar til et vanntrykk tilsvarende grunnvannsnivået. Vanntrykket langs tunnelkonturen i drenert område vil fortsatt være 0 bar. Det oppstår derfor en poretrykksdifferanse langs tunnelaksen, noe som innebærer at vann vil strøme fra udrenert til drenert tunnel. Det må derfor etableres «tettepropper» i hver ende av utstøpt seksjon/strekning for å hindre drenasje langs det utstøpte partiet. Tettesonene bør plasseres i et område med god bergmassekvalitet. Det er viktig å vurdere lengden på utstøpt strekning nøye, da for korte seksjoner kan

medføre at lekkasjer flytter seg til strekninger uten vanntett støp. Ved lange strekninger med utstøping bør det også vurderes å etablere flere «tettepropper» som dreneringsavskjærende tiltak langs tunnelaksen.

Arbeider med etablering av vanntett utstøping er tidkrevende, og vil hindre andre arbeider i den delen av tunnelen som skal støpes ut. Utstøpingen bør derfor etableres etter at strekningen er ferdig utsprengt. For å unngå uønsket innlekkasje og grunnvannssenkning i størst mulig grad også i anleggsfasen, vil det ikke være tilstrekkelig å kun basere seg på vanntett utstøping som tiltak. Systematisk forinjeksjon og beredskap for midlertidig vanninfiltrasjon i anleggsperioden vil være nødvendig.

3.4 Vanninfiltrasjon

En mulig løsning for å opprettholde grunnvannsnivå og unngå setningsutvikling, er å etablere et infiltrasjonsanlegg der vann (drikkevann fra kommunalt nett) pumpes inn i bergmassen fra borede brønner. Brønnene bør etableres og testes før anleggsstart. Det er flere utfordringer ved plassering av vanninfiltrasjonsbrønner:

- Det kan være vanskelig å estimere på forhånd hvor det vil være behov for vanninfiltrasjon.
- Dersom de plasseres for nære tunnelen kan man risikere at de tettes med injeksjonsmasse.
- Infiltrasjon tett på løsmasser kan medføre utvasking, erosjon og synkehull i løsmassene, samt vannutgang i terreng.

Vanninfiltrasjon som midlertidig tiltak er vanlig i tunnel- og byggegrop-prosjekter, og kan benyttes for å opprettholde grunnvannsstanden inntil permanent tetting av tunnelen er etablert. En ulempe ved infiltrasjon under tunneldriving kan være at man ikke har kontroll med effekten av tettetiltak som utføres i tunnelen. Bruk av vanninfiltrasjon krever derfor tett oppfølging for å sikre ønsket resultat.

I forskningsprosjektet Miljø- og samfunnstjenlige tunneler har Statens vegvesen utarbeidet en erfaringsrapport for vanninfiltrasjon [6]. I sammendraget er det gitt en tydelig anbefaling:

«Den kanskje viktigste anbefalingen når det gjelder vanninfiltrasjon for opprettholdelse av poretrykk i marine avsetninger er: Metoden anbefales primært anvendt som et midlertidig tiltak i byggefasen. Permanente anlegg bør generelt unngås, og betraktes som nødløsninger.»

Permanent infiltrasjon er tatt i bruk i et fåtall tunnelprosjekter som Norconsult er kjent med. Eksempler på dette er Romeriksporten (Jernbaneverket), Tåsentunnelen (Statens vegvesen) og VEAS avløpstunnel på Majorstuen (Vann- og avløpsetaten, Oslo kommune). I de tre prosjektene var det ikke planlagt for permanent infiltrasjon, og anleggene som er eller har vært i drift i lengre periode har vært en nødløsning. Det finnes også eksempler på tunnelprosjekter der man har planlagt med vanninfiltrasjon som midlertidig tiltak i byggeperioden, men hvor det har blitt behov for å etablere permanente infiltrasjonsbrønner etter ferdig drevet tunnel pga. ikke tilfredsstillende tetteresultat. Granfosstunnelen (Ring 3, Oslo) er et eksempel på dette.

Uavhengig av om anlegget er midlertidig eller permanent, vil infiltrasjonsanlegg kreve at det opprettholdes et program for kontroll av infiltrasjonsmengde og -trykk samt måling av poretrykk og setninger så lenge anlegget er i drift. Permanente infiltrasjonsanlegg krever også jevnlig ettersyn og vedlikehold, med f.eks. utskifting og rens av filter samt rengjøring av brønner med høytrykksspyling. Et slikt anlegg vil derfor medføre en ikke ubetydelig kostnad for årlig drift og oppfølging til evig tid, i tillegg til etableringskostnaden [6].

Vanninfiltrasjon som tiltak vil bli beskrevet nærmere i RA-B-017 Hydrogeologisk rapport.

I Middelalderbyen Bergen er det etablert lokale drenerings- og infiltrasjonstiltak i forbindelse med Bryggen og Hanseatisk museum. Anlegget ved Bryggen samler, infiltrerer og lagrer overflateavrenning, og har både til hensikt å håndtere flom ved store nedbørsmengder og økt havnivå, og bidra til å opprettholde grunnvannsnivå i kulturlag i tørre perioder. I tillegg til overflateavrenning ledes vann fra to pumper under Radisson-hotellet til infiltrasjon bak Bryggen for å opprettholde grunnvannsnivå i tørrere perioder. Ved Hanseatisk museum er det etablert en drensgrøft mot sjøfronten for å holde grunnvannsstanden stabil over tid.

3.5 Tetting av forskjæringer og byggegroper

Uttak av forskjæringer og byggegroper under grunnvannsstand kan også medføre en uønsket senkning av grunnvannet. Det legges derfor opp til at portalkonstruksjoner etableres som tette, udrenerte konstruksjoner. For å hindre midlertidig senkning av grunnvann før konstruksjonene er etablert, kan følgende tiltak påregnes:

- Forinjeksjon i berg før utsprengning – forutsettes i Heggebakken, Sjøgaten og for sjakt Fredens bolig
- Tetting av overgang mellom spunt og berg
- Midlertidig vanninfiltrasjon

3.6 Tettestrategi

3.6.1 Metoder og omfang

Det anbefales å legge til grunn systematisk forinjeksjon av hele banetunnelen og tilhørende forskjæringer, adkomster og bergrom

Nyere erfaringer fra forinjeksjon av tunneler med svært strenge tettekrav i Oslo-området viser at [7]:

- Arbeid under strenge tettekrav stiller høye krav til planlegging, metodikk og samhandling.
- Injeksjonsstrategien kan ikke baseres på tetteklasse alene. Vanskelige berg- og hydrogeologiske forhold kan kreve tilsvarende innsats ved mindre strenge tettekrav som ved strengere tettekrav for å sikre stabile poretrykk og innlekkasjer innenfor kravene.
- Strenge tettekrav medfører betydelig ressursbruk.

Erfaringer med innlekkasjer til eksisterende tunneler og resultater fra grunnundersøkelser, bl.a. kjerneboringer utført ved Sverresborg holdeplass, viser at bergmassen langs tunneltraseen kan forventes å være relativt lite permeabel, med få vannførende soner. Langsgående oppsprekking kan imidlertid medføre at vannførende soner kan følge tunnelen i lengre strekninger, og kreve betydelig tetteinnsats. Det foreligger lite/ingen dokumenterte erfaringer med resultater fra forinjeksjon av tunneler i området, og det er dermed noe vanskelig å forutsi hvor omfattende forinjeksjon som må forventes. Men generelle erfaringer fra tunnelprosjekter med strenge tettekrav tilsier at det er mange ulike forhold som har betydning for om man oppnår gode resultater, som utførende entreprenørs erfaring, utstyr og materialer, tidsbruk mm.

På strekningen med det strengeste tettekravet, der det er størst fare for negativ påvirkning av grunnvannsnivået ved Vågsbunnen, anbefales det å planlegge for etablering av udrenert vanntett utstøping

av banetunnelen. Dette gjelder strekningen fra påhugg Heggebakken til ca. profil 1200, dvs. de sørligste ca. 520 meter av tunnelen. I videre planlegging bør det vurderes om utvidelse av tverrsnittet for å ha plass til utstøping bør forlenges også videre nordover, for eksempel til profil 1500, der tunnelen går over i to enkeltsporsløp inn mot holdeplassen.

Det bør også vurderes om fordrøyningsbasseng og pumpestasjon ved lavbrekket kan flyttes ut av området med utstøping, da alle utvidelser, nisjer etc. vil komplisere utførelsen av den vanntette konstruksjonen. Drenssituasjon må utredes videre.

Videre bør det vurderes om det skal legges til grunn at støp etableres uansett tetterresultat, eller om man får god nok overvåkning av grunnvann i berg til at støp kan avbestilles dersom krav til maksimal grunnvannssenkning overholdes. Her er det viktig at man legger opp til en kontraktsmessig løsning som ivaretar ønsket fleksibilitet.

Det anbefales å planlegge med midlertidig vanninfiltrasjon som beredskap før tunnelen er ferdig tettet og vanntett utstøping er etablert.

3.6.2 Fremdrift

Arbeider med vanntett utstøping vil hindre tilkomst for andre arbeider i tunnelen, og bør utføres etter at tunnelen er ferdig utsprengt og sikret. Arbeidene vil være meget tidkrevende, i tillegg vil det ta tid å bestille og mobilisere støpeskjold og mannskap. Tiltaket bør derfor planlegges og bestemmes før oppstart.

Det er gjort en grov vurdering av byggetid for en ca. 500 meter lang vanntett utstøping.

Det forutsettes at det benyttes muligheten for adkomst fra begge sider, og at arbeidene vil pågå døgntkontinuerlig med to skift per døgn. Etter bunnrensk må både sålen og hvelvet utjevnes med magerbetong og sprøytebetong. Deretter monteres fiberduk og membran. Det antas at arbeidene vil kunne utføres suksessivt med noe overlapp, men på grunn av tilkomst for betongbiler antas det at membranen ikke kan monteres ferdig i hele strekningen.

Det antas videre at bunnseksjonen vil støpes et stykke i forkant av hvelvet. Utstøping av hvelvet vil da starte noe etter bunnseksjonen. I tillegg vil det være noen ukers arbeid med å forberede, støpe og injisere endeseksjonene samt eventuelle supplerende tettepropper. Etter at støpen er ferdig støpt og herdet, må det påregnes noe tid til injeksjon av riss og fuger. Total varighet på arbeidene anslås grovt til ca. 6-8 måneder.

3.6.3 Kostnader

For dobbeltsportunnel for Bybanen anslås en løpemeterkostnad på i størrelsesorden 250 000 kr /m for etablering av vanntett støp for et ca. 90 m² stort tunnelprofil. Normalt sprengningsprofil er ca. 74 m², som må utvides for plass til støp samt for å håndtere vanntrykket på konstruksjonen. Ekstra kostnad for sprengning av større tverrsnitt er ikke inkludert i løpemeterprisen. Kostnaden inkluderer rigg og drift, samt spesiell riggkostnad for støpearbeidene, herunder anskaffelse av støpeskjold.

Dette er et grovt estimat basert på oppjustering av løpemeterkostnad for mindre tverrsnitt, da Norconsult ikke kjenner til faktiske kontraktspriser for støp av tilsvarende tverrsnitt.

4 Tiltak for å overvåke og dokumentere krav

Det må etableres et overvåkningsprogram for grunnvannsnivå så snart som mulig, for å samle en lang nok tidsserie med målinger som gjør det mulig for å kunne se forskjellen mellom naturlige korttids- og sesongvariasjoner og de som er forårsaket av baneanlegget. Programmet kan bestå av ulike målemetoder:

- Poretrykksmålere og fjellbrønner, med varslings- og tiltaksgrenser
- Setningsmålinger (nivellement på målebolter)
- evt. bruk av InSAR data

Grunnvannsnivået bør logges over en lang tidsperiode, både før og etter tunneldriving, for å kunne fange opp relativt små nivåendringer for grunnvann over tid (i størrelsesorden ≤ 10 cm). I utvelgelsen av målepunkter kan det derfor være fordelaktig å se etter eksisterende fjell- og miljøbrønner som viser relativt beskjedne sesongvariasjoner i grunnvannsnivå, men som har en god forbindelse med grunnvannet i berg.

For å overvåke om tunnelen blir tett nok i anleggsperioden, bør det utføres målinger i fjellbrønner (overvåkningsbrønner) tett på tunnelen. Her vil påvirkningen på grunnvannsnivå være større og kunne registreres tidligere enn i kulturlag innenfor Middelalderbyen.

InSAR data kan være et nyttig supplement til nivellering, for å få en oversikt over pågående setningsutvikling i større områder. InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) er satellitt-baserte målinger av små terrengendringer.

Overvåkningsprogram vil bli beskrevet nærmere i RA-B-017 Hydrogeologisk rapport.

5 Oppsummering og anbefaling

Det legges til grunn en forutsetning om at grunnvannsstand ikke skal påvirkes innenfor Middelalderbyen Bergen der det forekommer kulturlag i grunnen. Målet er å opprettholde vannbalansen i området slik den er før bygging, og ikke påvirke hverken kulturminner eller andre anlegg og bebyggelse.

Simuleringer av ulike lekkasjesituasjoner til tunnelene i den numeriske grunnvannsmodellen viser at innlekkasjen må begrenses til i størrelsesorden 0-5 liter/min/100 meter tunnel, med det strengeste kravet til tetthet på strekningen nærmest Heggebakken.

Tettekrav på 0-2 l/min/100 m er så tett at det ikke er mulig å måle i tunnel under driving eller etter gjennomslag med god nok nøyaktighet. Grunnvannssenkning i størrelsesorden 10 cm i løsmasser er mindre enn naturlige variasjoner, og for lite til å kunne måles på kort sikt under bygging. Det må vurderes over en lengre tidsperiode (flere år) om man har overholdt kravet. Tetteinnsatsen må derfor styres etter overvåkning av grunnvannsstand i berg nær traseen, der en mulig påvirkning vil registreres først.

Det anbefales å legge til grunn systematisk forinjeksjon av alle tunneler og bergrom.

Vanntett utstøping av hele tunnelprofilen vurderes som den metoden med minst restrisiko med tanke på å oppnå en permanent tett og ikke drenerende løsning på strekningen med svært strenge krav til tetthet og minimal grunnvannssenkning. Løsningen er imidlertid svært kostbar og innebærer forlenget byggetid. En beslutning/plan om utførelse av vanntett støp bør tas før bygging starter. Å avvente en beslutning kan få store kostnads- og fremdriftskonsekvenser.

Konstruksjonen etableres med membran bak støpen for å hindre lekkasjer gjennom eventuelle riss i betongen. Det må settes av plass til å etablere utstøping på aktuell strekning. Det anbefales foreløpig å

planlegge for at banetunnelen fra påhugg Heggebakken (pr. 680) til profil 1200 støpes ut. Dersom forinjeksjon blir vellykket og det ikke registreres senkning av grunnvannsstand i berg utover kravene, kan man vurdere å avlyse tiltaket.

Videre bør det vurderes om tverrsnittet tilpasset støp også bør forlenges videre nordover mot holdeplassen.

Det bør etableres et system av brønner med beredskap for midlertidig vanninfiltrasjon, for opprettholdelse av poretrykk under anleggsfasen. Vanninfiltrasjon som permanent løsning frarådes.

Det må etableres et overvåkningsprogram for grunnvannsnivå så snart som mulig, slik at naturlige korttids- og sesongvariasjoner kan dokumenteres. Programmet må være i drift gjennom anleggsperioden og en tid etter.

Ved videre detaljprosjektering kan det vurderes nytten av å utføre supplerende undersøkelser, for eksempel kjerneboring langs søndre del av banetunnelen. Det poengteres imidlertid at man ikke kan forvente at flere grunnundersøkelser vil gi grunnlag for å revurdere tettekravene eller anbefalingen om vanntett utstøping, men at supplerende informasjon om bergmassen langs tunneltraseen kan være et nyttig grunnlag for detaljprosjektering og planlegging av injeksjonsstrategi.

6 Referanser

- [1] H. de Beer, *Statusrapport grunnvannsovervåkning og hydrogeologisk modellering ved Bryggen i Bergen (NGU rapport 2008.069)*, Trondheim: Norges geologiske undersøkelse, 2008.
- [2] RA-B-016 *Numerisk grunnvannsmodell for Bybanen. Simulering tunnel-innlekkasjes påvirkning på grunnvannsnivå innenfor Middelalderbyen*, Norconsult Norge AS, 2026.
- [3] H. de Beer og M. Böhme, *Anbefalinger om akseptkriterier for grunnvannspåvirkning ved prosjektering av Bybanetunnel, Bergen (v.05.05.2026)*, Trondheim: Norges geologiske undersøkelser, 2026.
- [4] K. Karlsrud, L. Erikstad og P. Snilsberg, *Publikasjon nr. 103: Undersøkelser og krav til innlekkasje for å ivareta ytre miljø. Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*, Statens vegvesen, Vegdirektoratet, 2003.
- [5] J. Langford, K. H. Holmøy, T. F. Hansen, K. G. Holter og E. Stein, *Analysis of water ingress, grouting effort, and pore pressure reduction caused by hard rock tunnels in the Oslo region*, Tunneling and Underground Space Technology 130, 2022.
- [6] *Vanninfiltrasjon. Erfaringer og anbefalinger. Miljø- og samfunnstjenlige tunneler. Intern rapport nr. 2324*, Statens vegvesen, 2003.
- [7] Statnett SF. *Kabeltunnel Sogn - Ulven. Ingeniørgeologisk sluttrapport*, NGI/Norconsult, 2026.