

MÄTNING AV INLÄCKANDE VATTEN TILL BERGTUNNAR

Kent Hansson

Tomas Svensson

Axel Möller

Pia Larch

Bengt Åhlen

MÄTNING AV INLÄCKANDE VATTEN TILL BERGTUNNLAR

MEASUREMENT OF LEAKAGE INTO TUNNELS

Kent Hansson, Geosigma AB

Tomas Svensson, Geosigma AB

Axel Möller, Geosigma AB

Pia Larch, Geosigma AB

Bengt Åhlen, Geosigma AB

Förord

Mätning av inläckande vatten görs i flertalet bergtunnlar både under bygg och driftskeden. Relativt stränga miljödomar innebär begränsning av den mängd vatten som tillåts läcka in i en tunnel. Inläckage innebär förutom yttre miljökonsekvenserna negativ påverkan på berganläggningar i form av fukt, korrosion, frostsprängningar, accelererad åldring etc. Inläckande vatten behöver kontrolleras i syfte att förhindra yttre och inre negativ påverkan och konsekvenser. Kontrollen kan ske genom mätning och mätförfarandet skall vara tillförlitligt med adekvat noggrannhet. Kontroll är en förutsättning för att kunna kontrollera och åtgärda vattenproblematiken.

Vattenproblematiken har många sidor. Inläckage varierar med årstid, kan vara temporärt, kan komma via tunnelmynningar, ventiler, ledningar, mätvallar, borrning, spolning, bult och injekteringshål mm förutom genom sprickor i bergmassan. Det finns olika mätsystem, typer av mätanordningar och inte minst skiljer kostnad och noggrannhet beroende på vald strategi.

Föreliggande rapport behandlar problematiken och utgör ett första steg för utveckling av kostnadseffektiva, snabbetablerade mätutrustningar som ger möjlighet att mäta inläckage i tunnlar under såväl bygg som driftskeden. Projektet har genomförts av Kent Hansson och Tomas Svensson på Geosigma AB.

Stockholm i november 2010

Mikael Hellsten

Inledning

Vatteninläckage till tunnlar kan orsaka grundvattenavsänkningar i omgivningarna, som i sin tur kan påverka befintliga byggnationer, mark och växtlighet. Vidare kan det inläckande vattnet påverka miljön och installationer i tunnlar. De inskrivna kraven i miljödomar mm är ofta av typen; inläckaget till hela eller delar av tunneln får inte vara större än ett visst antal liter/min och 100 m tunnel eller tunnelrör. Kraven kan kombineras med att grundvattensänkningen inte få underskrida "larmnivåer" i omgivningen. Restriktionerna under byggtiden behöver inte vara desamma som för den efterföljande driften.

Kraven på Vägverket och Banverket (Trafikverket) att fortlöpande dokumentera inläckaget inom olika tunnelavsnitt har ökat under de senaste åren.

De skärpta kraven har inneburit att kostnaderna för mätanordningar för inläckande vatten har ökat. En annan synpunkt är att etableringar av mätanordningar tar lång tid

I rapporten görs kostnadsskattningar för byggnation och drift av mätvallar med tillhörande mätare. Även om kostnaden för mätningar varit höga och ökat de sista åren, så utgör de en mycket liten del av kostnaden för injektering.

Hana Liszka på Vägverket var initiativtagare för att få till ett projekt för att bl.a. utveckla kostnadseffektiva och snabbetablerade mätutrustningar som ger möjlighet att mäta inläckage inom såväl tunnelavsnitt som hela tunnlar, för både bygg- som driftskeden. Projektet blev ett BeFo-projekt och fick beteckningen; "BeFo 253 Mätning av inläckande vatten i bergtunnlar".

I projektet skulle bl.a. ingå att:

- Sammanställa nuvarande och förväntade framtida krav på inläckagemätningar i olika typer av tunnlar.
- Utredda svårigheter med att mäta flöden i tunnlar där läckagekraven är satta mycket höga .
- Sammanställa bra befintliga mätinstallationer, samt ge förslag på andra kostnadseffektiva installationer.

Planer finns för ytterligare en etapp som kan omfatta tillverkning av några system som diskuterats i denna rapport. system för olika tunnlar, med olika läckage krav.

Det nu aktuella projektet skulle bekostas av BeFo, Vägverket och det konsultföretag som skulle utföra arbetet.

en referensgrupp som utsågs bestod av:

Thomas Dalmalm Vägverket

Hana Liszka Vägverket

Roland Ekenberg Nitro Consult AB

Karl Persson Bergab

Ulf Sundquist Aqualog AB

Örjan Wolff Bergab

Mikael Hellsten BeFo.

Geosigma AB gjorde år 2009 en internutredning som behandlade inläckage till några tunnlar som byggts under det senaste 10 åren. Detta i kombination med att företaget utvecklar olika typer av mätinstrument var anledning till att Geosigma blev tillfrågad att delta i projektet.

Ett 50-tal personer har varit involverade med att ta fram uppgifter och avgett synpunkter om inläckagemätningar. De personer som kontaktats har ofta fått avge sina uppgifter direkt vid samtalet utgående från deras nuvarande minnesbild. Stor tacksamhet riktas mot alla dessa personer.

Synen på inläckagemätningar har varierat mycket beroende på vad personerna representerat. I rapporten redovisas ett urval av dessa synpunkter. Personerna har bl.a. representerat:

Vägverket

Banverket

Stockholms Länstrafik

Stockholms Landsting

Svensk kärnbränslehantering AB

Posiva OY

Konsultföretag, involverande personer som ansvarat för eller varit delaktiga i inläckagemätningar

Entreprenörer

Projektörer

Byggledare

Projektledare

Försäljare av olika typer av mätare

Speciellt tack riktas till Referensgruppen som på ett mycket konstruktivt sätt bidragit med faktakunskaper och synpunkter på de utkast till skrivningar som presenterats under projektets gång, samt medarbetare på Geosigma.

Kent Hansson och Tomas Svensson Geosigma AB

Innehållsförteckning

1	Sammanställning över nuvarande och framtida krav på inläckagemätningar i olika typer av tunnlar	1
1.1	Kort beskrivning över beslutsprocesser med anknytning till inläckage till tunnlar.	1
1.1.1	Inläckagemängder inom ramen för tillståndsprövning enligt 11 kap. miljöbalken	1
1.1.2	Förmedling av; beslut, krav och intentioner under tunnelprojekt.	2
1.2	Sammanställning över exempel på nuvarande och tänkbara framtida krav angående mätning av inläckage till tunnlar.	4
1.2.1	Allmänna krav och anvisningar.	4
1.2.2	Exempel på uppställda krav för tunnlar byggda under senaste tio åren	6
1.2.3	Krav på påbörjade, planerade och framtida tunnlar	8
1.3	Kapitel 1, sammanfattning.	9
2	Utredning om svårigheter att mäta flöden i tunnlar där maximala inläckage är satta mycket låga.	11
2.1	Beskrivning av mätanordningar som använts i tunnlar där inläckagen inte får överskrida ca. 1L/min per 100 m tunnel.	11
2.2	Skattning av olika vattenflöden som kan påverka mätningar av inflöden i tunnlar där läckagekraven är satta mycket höga.	11
2.2.1	Fuktvandring via ventilationssystem.	12
2.2.2	Vattenförbrukning under byggskeden	14
2.2.3	Läckage i ledningar, brunnar och ventiler	16
2.2.4	Vattentransport via fordon	17
2.2.5	Vatten som kommer in via tunnelmynningen	17
2.2.6	Läckage i och under mätvallar	17
2.2.7	Temporära inläckage i uppborrade injekteringskärmor och bulthål	25
2.3	Förslag på redovisning av mätvärden från tunnelavsnitt där maximala inläckage inte får överskrida 1L/min per 100 m tunnel.	25
2.4	Kapitel 2, sammanfattning.	28
3	Sammanställning befintliga installationer och mätutrustningar.	33
3.1	Befintliga mätsystem utomlands.	33
3.1.1	Australien	34
3.1.2	Norge	35
3.1.3	Österrike	37
3.1.4	Schweiz	37
3.1.5	USA	38
3.1.6	Övriga internationella exempel	39
3.2	Befintliga mätsystem i Sverige	40
3.2.1	Övergripande mätstrategier som använts i tunnlar	40
3.2.2	Uppsamlingsanordningar	41
3.2.3	Mätare som använts eller testats i tunnlar	50
3.2.4	Mätningar i öppna ledningar.	53

3.2.5	Mätningar i slutna ledningar.	58
3.2.6	Flödesmätningar från dräner.	60
3.2.7	Flödesmätningar av små inläckage från väggar och tak.	60
3.2.8	Inverkan på flödesmätningar utgående från vald pumpteknik	61
3.2.9	Sammanställ kostnadsfördelningar för anläggning av mätvall och installation av mätton	64
3.3	Kapitel 3, sammanfattning.	65
4	Sammanställning över bra, befintliga och prisvärda mätanordningar, samt förslag på nya konstruktioner.	69
4.1	Sektionsvisamätningar där läckagekraven är maximerade till 1 L/min per 100 m tunnel.	69
4.2	Mätningar under byggsleden.	70
4.3	Mätningar under driftskeden.	78
4.4	Samtidiga mätningar av dag- och dräneringsvatten under driftfasen.	80
4.4.1	Standardmetod	80
4.4.2	Kombinerat dränerings-och dagvattensystem	80
4.5	Kapitel 4, sammanfattning.	82
5	Referenser.	85
	Bilaga A. Fuktvandring via ventilationssystem.	86
A.1.	Fuktvandring via ventilationssystem.	87
A 1.1	Beräkningsunderlag	87
A.1.2.	Resultat	90
	Bilaga B Läckage i och under mätvallar.	92
B.1.	Läckage i och under mätvallar.	93
B.1.1.	Modelluppbyggnad	93
B.1.2.	Modellkörningar	96
B.1.3.	Resultat	96
B.1.4.	Diskussioner	111

Sammanfattning

Syftet med studien som omfattas av denna rapport är att bl.a. att ge förslag på kostnadseffektiva, och snabbetablerade mätutrustningar som kan mäta små och stora flöden och som ger möjlighet att fortlöpande dokumentera inläckaget inom olika tunnelavsnitt. Studien omfattar:

- Sammanställning över nuvarande och framtida krav på inläckagemätningar i olika typer av tunnlar.
- Utredning om svårigheter att mäta flöden i tunnlar där läckagekraven är satta mycket låga.
- Sammanställning över bra befintliga installationer samt andra förslag på kostnadseffektiva och bra installationer.

Avrapporteringen har delats in i fyra kapitel, se nedan.

1. Sammanställning över nuvarande och framtida krav på inläckagemätningar i olika typer av tunnlar

Kapitlet innehåller:

- Beskrivning av beslutsprocesser omfattande:
 - Tillståndsprovningar
 - Förmedling av beslut och krav under ett tunnelprojekt.
- Sammanställning över exempel på nuvarande och framtida krav angående mätning av inläckage, omfattande:
 - Övergripande krav och anvisningar
 - Exempel på fastställda krav i olika tunnlar som byggts under de senaste 10-åren
 - Funderingar angående krav för framtida tunnlar.

Av texten framgår bl.a. att:

- Inläckagefrågor bör finnas med på agendan vid de flesta typer av möten i ett tunnelprojekt.
- De handlingar som utarbetas under projekteringsfasen bör bl.a. innehålla; tydliga direktiv angående intentionen med mätningarna, hur mätningar skall göras och hur mätanordningar skall skötas.
- Två nya övergripande handlingar ("Tekniska krav tunnel" och "Tekniska råd tunnel") kommer att tas fram av Trafikverket. Inga övergripande handlingar förväntas tas fram på EU-nivå under de närmaste åren.
- Kraven på svenska tunnlar förväntas inte förändras så mycket de kommande åren, förutom när det gäller bestraffning vid överträdelser av uppsatta maximala

inläckagevärden. Dessutom kan fler tunnlar komma att omfattas av sektionsvisa mätningar under driftskedet.

2. Utredning om svårigheter att mäta flöden i tunnlar där maximala inläckage är satta mycket låga.

Kapitlet innehåller:

- Beskrivningar av mätanordningar som använts i tunnlar där inläckagekrav legat under 1 L/min per 100 m tunnel.
- Skattningar av ”ovidkommande flöden” som kan påverka inläckagemätningar.
- Simulering läckage under mätvallar.
- Förslag på redovisning av mätvärden från tunnelavsnitt där det maximala inläckaget inte får överskrida 1 L/min per 100 m tunnel.

Av texten framgår bl.a.:

- Skattningar redovisas över storleken på flöden för olika typer av ovidkommande vatten (bl.a. fuktvandring i ventilationssystem, läckage i ledningar och under mätvallar). Dessa flöden har betydelse för redovisade inläckagevärden. Utgående från gjorda skattningar så verkar summaeffekten av ovidkommande vatten bli betydande vid jämförelser med lågt satta maximala inflödena.
- Eventuellt införande av juridiskt bindande begränsningsvärden i kombination med lågt satta maximala inläckagevärden kan komma att drastiskt öka tunnelägarens kostnader för kontroller under byggskedet och eventuella efterföljande juridiska tvister.
- Mätosäkerhetsanalyser i början av ett tunnelprojekt kan vara till hjälp för att bedöma om den totala mätosäkerheten ligger på acceptabel nivå eller för att konstatera var förbättringsåtgärder effektivast skall sättas in för att totalfelet skall minska.
- Att redovisa en bedömning på total mätosäkerhet för mätserier eller medelvärden på inläckagemätningar behöver inte bli ett så omfattande arbete. Bedömningen kan baseras på mätta, skattade eller normvärden för de olika komponenterna av ovidkommande flöden. Förhållningssättet skulle troligen också stimulera till förbättringar när det gäller att upprätthålla eller få ner osäkerheterna i redovisade inläckagemätningar.
- Mätvallar kan utformas olika beroende på hur lågt det maximala inflödet är satt i det aktuella tunnelavsnittet.

3. Sammanställning befintliga installationer och mätutrustningar.

Kapitlet innehåller bl.a.:

- Genomgång av befintliga mätsystem i några utvalda länder.

- Genomgång av befintliga mätsystem Sverige, omfattande bl.a.:
 - Övergripande mätstrategier
 - Uppsamlingsanordningar (diken, pumpgropar, mätvallar)
 - Mätare som använts eller testats i tunnlar, både för öppna och slutna ledningar
 - Inverkan på flödesmätningar utgående från vald pumpsteknik
 - Sammanställning över kostnader för anläggning av mätvallar och installation av mätton

Av texten framgår att:

- Utgående från de svar som erhållits från konsultföretag, entreprenörer och myndigheter i några utvalda länder (Australien, Norge, Österrike, Schweiz och USA) så verkade mätningar inte göras med några av myndigheter rekommenderade standardmetoder. Mätare och mätmetoderna liknar de som används i Sverige.
- I Sverige har sektionvisa inläckagemätningar under driftskeden varit ovanliga, men kan komma att bli mer frekventa i framtiden.
- Utbyggnad av mätanordningar har ofta inte skett i den takt som är nödvändig för att erhålla tidiga mätvärden på inläckage.
- Inläckagemätningar görs ofta då ingen annan aktivitet pågår i tunneln, men även då olika aktiviteter pågår. Det är då viktigt att påverkan från aktiviteterna kan urskiljas.
- Valet av uppsamlingsanordning för vatten har vanligen gjorts utgående från; hur snabbt mätningar skall påbörjas, mätosäkerhet på mätningar, tillåtna kostnader och lutningsförhållanden på platsen
- Valet av mätare har inte alltid gjorts utgående från; förväntade flöden, önskad noggrannhet på mätvärden och önskad mätfrekvens. I texten redovisas flera typer av mätare både för öppna och slutna ledningar, samt deras noggrannheter.
- Mätvall med registrerande mätare, anlagd före driftskedet beräknas kosta mellan ca. 250 000-280 000 kr, varav kostnaden för ridåinjektering utgörs av ca. 50 000 kr

4. Sammanställning över bra, befintliga och prisvärda mätanordningar, samt förslag på nya konstruktioner.

Kapitlet innehåller skrivningar om:

- Sektionsvisa mätningar där läckagekraven är maximerade till 1 L/min per 100 m.
- Mätningar under byggtiden, omfattande:
 - Mätningar av flöden vid tunnelfront
 - Mätningar av inläckage med hjälp av olika typer av uppsamlingsanordningar (pumpgropar, mätvallar, diken).
 - Mätningar av inläckage med hjälp av spårämnen.
 - Mätning med mobila enheter
- Mätningar under drifttiden omfattande:

- Inläckagemätning för hel tunnel
- Inläckagemätningar för hel tunnel, med information om inläckage även för sektioner av tunneln
- Mätningar av inläckage i avsnitt längs järnvägstunnlar.
- Sektionsvisa mätningar med hjälp av en låg mätvall.
- Samtidiga mätningar av dag- och dräneringsvatten under driftfasen omfattande:
 - Kombinerat dränerings-och dagvattensystem

Av texten framgår att:

- Det finns många synpunkter om nuvarande inläckagemätningar, bl.a.; tar det lång tid att få tillstånd, stör utbrytningen av tunnlar, innehåller ofta stora fel och är dyra.
- Uppsamlingsanordningar av typ; pumpgropar, mätvallar och diken med tillhörande mätare kan anpassas utgående från; nödvändiga mätosäkerheter på mätningar, kostnader och önskade etableringstider. Fler exempel på sådana anpassningar redovisas i texten.
- Utspädningsmätningar med hjälp av spårämnen är en relativt billig metod som kan börja användas i tidiga skeden i tunnlar. Mätvärden erhålls dock bara vid mättillfällena. Det är en metod som bör testas.
- Riktlinjer bör tas fram på maximala höjder på mätvallar, som kan installeras för driftskeden i olika typer av ”väg- och bankroppar”. Dessa riktlinjer kan användas för design av mätvallar som både kan användas under både bygg- och driftskeden.
- Mobila mätare som periodiskt ansluts till uppsamlingsanordningar, reducerar kostnader. Exempel på mätare redovisas i texten.
- Dagvattensystemet längs en tunnel kan användas för att bortleda dräneringsvattnet från tunnelavsnitt, efter det att mätningar gjorts. Förfarandet reducerar ledningskostnader.

Summary

The aim of the study presented in this report is, among others, to provide suggestions for cost effective and fast-established measurement equipments, capable of measuring large and small flows and capable to continuously record the leakage inflow within different tunnel sections. The study includes:

- Compilation of current and future demands on inflow measurements in different types of tunnels
- Investigation of difficulties in measuring flows in tunnels where the requirements on leakage inflow are set very low.
- Compilation of efficient existing installations as well as other proposals on cost-effective and efficient installations.

The reporting has been divided into four chapters, see below.

1. Compilation of current and future demands on leakage inflow measurements in different types of tunnels

This chapter includes:

- Description of the decision processes including:
 - Permit trials
 - Communication of decisions and requirements during a tunnel project
- Compilation of examples of current and future demands on the measurement of leakage inflow, including:
 - Overall requirements and instructions
 - Examples of regulatory requirements in different tunnels built during the last 10 years
 - Ideas regarding requirements for future tunnels

From the text is clear that:

- Leakage inflow issues should be on the agenda at most types of meetings in a tunnel project
- The guiding documents prepared during the design phase should include a.o; clear directives regarding the intention of the measurements, how the measurements should be carried out and how the measuring devices should be managed
- Two new comprehensive documentations ("Technical Requirements, tunnel" and "Technical advices, tunnel") will be prepared by the Swedish Transport Administration. No comprehensive documentation is expected to be developed at European (EU) level in the coming years

- The requirements for Swedish tunnels are not expected to change very much in the coming years, except regards the penalty for violating the established maximum values on leakage inflow. In addition, more tunnels may be comprised by sectionwise measurements during the operating phase.

2. Investigation of difficulties in measuring flows in tunnels where the maximum leakage inflow is set very low

This chapter includes:

- Descriptions of measurement devices used in tunnels with criteria on the leakage inflow below 1 L/min per 100 m of tunnel
- Estimates of “irrelevant flows” that may affect leakage inflow measurements
- Simulation leakage below dams
- Proposals for reporting of measurement values from tunnel sections where the maximum leakage inflow rate is not allowed to exceed 1 L/min per 100 m of tunnel.

From the text is clear that:

- Estimates of the size of flows are presented for different types of irrelevant water (including a.o. moisture migration in ventilation systems, leaks in pipes and below dams). These flows are important for the assessment of presented leakage inflow values. Based on estimates made, it seems that the cumulative effect of irrelevant water will be significant when compared to stipulated conservative maximum inflows
- Possible introduction of legally binding limiting values in combination with stipulated low maximum values of leakage inflow may drastically increase the tunnel owner's costs for inspections during the construction phase and any subsequent legal disputes
- Analyses of measurement uncertainties in the beginning of a tunnel project may help to assess if the total measurement uncertainty is at an acceptable level or to establish where improvements most effectively should be implemented to reduce the total error
- To report an assessment of overall measurement uncertainty for series of measurements or average values of leakage inflow measurements need not be a very extensive work. The assessment may be based on measured, estimated or standard values respectively for the various components of irrelevant flows. The approach would probably also stimulate to improvements when it comes to maintain or reduce the uncertainties in the reported leakage inflow measurements
- Dams with weirs or other type of sensors can be designed differently, depending on how low the maximum inflow is set in the actual tunnel section

3. Compilation of existing installations and measurement equipments

The chapter includes:

- Review of existing measurement systems in a few selected countries

- Review of existing measurement systems in Sweden, including a.o.:
 - Overall measurement strategies
 - Collection devices for water (ditches, pump pits, dams)
 - Meters used or tested in tunnels, both for open and closed pipes, respectively
 - Impact on flow measurements based on selected pumping technology
 - Compilation of costs for the construction of dams and installation of gauges

From the text is clear that:

- Based on the replies received from consulting firms, contractors and government agencies in a few selected countries (Australia, Norway, Austria, Switzerland and the USA) it seems that measurements are not made with recommended standard methods by the authorities. The gauges and measurement methods are similar to those used in Sweden
- In Sweden, sectionwise measurements of the leakage inflow during operation phases have been rare, but may become more frequent in the future
- Extension of measurement devices have often not occurred in the necessary rate to obtain early measurements of leakage inflow
- Measurements of the leakage inflow are often done when no other activity is going on in the tunnel, but also when different other activities are going on. In these cases it is important that the impact from the different activities can be distinguished
- The choice of collecting devices for water has usually been based on; how fast the measurements must be started, the uncertainty of the measurements, allowable costs and sloping conditions at the site
- The choice of gauges has not always been based on; expected flows, desired accuracy of measurements and desired measurement frequency. The text presents several types of gauges, both for open and closed pipes together with their accuracies
- Dams with recording gauges, constructed before the operation phase is estimated to cost between c. 250 000-280 000 SEK of which the cost of curtain grouting consists of c. 50 000 SEK

4. Compilation of good, existing and price worthy measurement devices as well as suggestions for new designs

This chapter includes descriptions of:

- Sectionwise measurements where the requirements on leakage inflow are maximized at 1 L/min per 100 m of tunnel
- Measurements during the construction phase, including:
 - Measurements of the flow at the tunnel front
 - Measurements of leakage inflow by means of different types of collection systems (pump pits, dams, ditches)
 - Measurements of leakage inflow by means of tracers
 - Measurements with mobile devices
- Measurements during the operation phase including:

- o Leakage inflow measurement for the entire tunnel
- o Leakage inflow measurements for the entire tunnel, also including information on leakage inflow for tunnel sections
- o Leakage inflow measurements in sections along the railway tunnels
- o Sectionwise measurements using a low dams
- Simultaneous measurements of storm water and drainage water during the operations phase comprising:
 - o Combined drainage and stormwater systems

From the text is clear that:

- There are several views on current leakage inflow measurements, among others, it takes a long time to get permissions, interference with the excavation of tunnels, often contain large errors and are expensive
- Collection devices of type, pump pits, dams and ditches with associated gauges can be adjusted based on; necessary uncertainties of measurements, costs and desired establishment times. More examples of such adjustments are reported in the text
- Dilution measurements using tracers is a relatively inexpensive method that can be implemented in the early stages in tunnels. Readings are however only obtained at the times of measurement. It is a method that should be tested
- Guidelines should be developed for maximum heights of dams, which can be installed for operation phases of the various types of “road and railway embankments”. These guidelines can be used for the design of dams that can be used both during construction and operational phases.
- A mobile meter that is periodically connected to collecting devices reduces costs. Examples of meters are reported in the text
- The storm water system along a tunnel can be used to discharge the drain water from tunnel sections, after measurements have been made. The procedure reduces costs of pipe lines

1 Sammanställning över nuvarande och framtida krav på inläckagemätningar i olika typer av tunnlar

1.1 Kort beskrivning över beslutsprocesser med anknytning till inläckage till tunnlar

Vatteninläckage till tunnlar kan påverka den omgivande miljön samt miljön i en tunnel under såväl bygg- som driftskeden. Påverkan på omgivande miljö kan exempelvis vara sjunkande grundvattenytor. Kraven för att minimera dessa effekter uppställs både av Miljödomstolar och av beställare. Dessa krav tillsammans med andra övergripande handlingar utgör grunden för hur man skall utforma mätstrategier och mätanordningar för att mäta inläckage av vatten, samt åtgärda uppkomna problem. Som en introduktion för redovisningen av olika mätstrategier och mätanordningar görs i detta kapitel en mycket övergripande genomgång av:

- Tillståndsprövningar
- Förmedling av beslut och konsekvenser av beslut i aktuellt byggprojekt.
- Allmänna krav och anvisningar.

Vidare redovisas exempel på olika typer av krav som uppställts för tunnelprojekt under de senaste tio åren.

1.1.1 Inläckagemängder inom ramen för tillståndsprövning enligt 11 kap. miljöbalken

För bedrivande av vattenverksamhet såsom bortledande av grundvatten vid byggande av exempelvis tunnlar, föreligger som absolut huvudregel förprövningsplikt enligt 11 kap. miljöbalken. Det innebär att sådan vattenverksamhet inte får påbörjas innan erforderligt tillstånd föreligger. Sökanden skall tillhandahålla domstolen så robust utredningsmaterial att tillstånd med hänsyn till bl.a. hänsynsreglerna i 2 kap. miljöbalken kan meddelas. I detta krav ligger att sökanden skall föreslå de skyddsåtgärder och försiktighetsmått som erfordras för att påverkan från vattenverksamheten blir acceptabla och tillstånd kan meddelas. Av praxis framgår att sökanden svårligen kan undgå villkor i tillståndsdomen som anger mängder av inläckande grundvatten i aktuella anläggningsdelar. Det är därför lämpligt att sökanden i ansökan själv föreslår sådana villkor och att dessa mängder tydligt motiveras i underlagsmaterialet (geohydrologisk utredning och miljökonsekvensbeskrivning).

Föreslagna mängder måste utgå från behovet av att kunna exempelvis bygga en tunnel. Tunneln måste kunna hållas torr. Föreslagna mängder skall avse mängd per någon tidsenhet. Lämpligen anges föreslagna mängder som ett medelvärde beräknat på 30 dagar, en månad, tre månader eller liknande. Sökanden bedömer lämpligheten i och behovet av att även koppla mängderna till en sträcka. Föreslagna mängder måste vara så

väl tilltagna att sökanden bedömer att de inte kommer att överskridas under byggskedet och driftskedet. De måste även vara så utformade att de går att kontrollera. Sökanden skall redovisa miljöpåverkan och behovet av skyddsåtgärder och försiktighetsmått bl.a. utifrån föreslagna mängder (omfattningen av influensområdet, påverkan på grundvattennivåer, sättningsrisk för byggnader m.m.).

Under tillståndsprovningen vid miljödomstolen åligger det sökanden att visa domstolen att sökanden kan övervaka och kontrollera vattenverksamheten, se 22 kap. 1 § 5 miljöbalken. Detta krav innefattar en skyldighet att visa att de inläckagemängder avseende grundvatten som domstolen kommer att bestämma kan mätas med vederhäftiga metoder och att utfallet av dessa mätningar visar korrekta förhållanden. Lämpligen sker detta genom att sökanden i målet tillhandahåller ett kvalificerat utkast till kontrollprogram. Länsstyrelsen, kommunen, sakägare m.fl. ges möjlighet att yttra sig över utkastet. Sökanden bör yrka att kontrollprogrammet inte skall fastställas i domen, till undvikande av att innehållet i det låses. Kontrollprogrammet kommer att under byggskede och driftskedet vara ett levande dokument. Länsstyrelsen har möjlighet att vid behov begära kompletteringar och justeringar i kontrollprogrammet.

1.1.2 Förmedling av; beslut, krav och intentioner under tunnelprojekt *Projekteringsfas*

Inför tunnelbygget anlitar beställaren projektörer som ingår i deras projektgrupp. Dom gör och ser till att alla handlingar tas fram för byggprocessen. Då beställarens sakkunniga arbetar mycket integrerat med projektörerna så borde kommunikationen fungera bra så att alla de intentioner som beställaren har blir beaktade när det gäller exempelvis mätningar av inläckage. Under projekteringsfasen hålls projekteringsmöten där delbeslut tas för att gå vidare med projekteringen. Projekteringsfasen avslutas med ett erfarenhetsåterföringsmöte. Projekteringsarbetet utmynnar i en rad handlingar.

Exempelvis:

- Rapport över förundersökningar avseende geologiska och hydrologiska förhållanden.
- Sammanställningsritningar
- Översiktsritningar, systembeskrivningar och förteckningar
- Detaljritningar och övriga handlingar
- Beräkningar och utredningar
- Arbetsbeskrivningar
- Kontrollplaner

Redan i den inledande delen av projekteringsfasen bör beställaren översiktligt lägga fast strategin när det gäller inläckagemätningar, involverande ungefärliga kostnader och övergripande upplägg för mätförfarandet, samt hur mycket mätningar får inkräkta på driften.

Det är viktigt att det på erfarenhetsåterföringsmötet görs en avstämning mot intentioner och de fastställda kraven i de handlingar som sammanställdes i samband med projekteringen.

Om det finns en hög ambition att inläckagemätningar skall utföras, så bör handlingarna även omfatta skrivningar angående konsekvenser i det fall riktlinjerna inte följs.

Upphandlingsfas

Det finns flera typer av upphandlingar. Utförandeentreprenader har varit vanlig vid upphandling av tunnelprojekt. Oavsett upphandlingstyp så skickas offerförfrågan ut till olika entreprenörer. I förfrågan ingår de underlag som tagits fram under projekteringen. Under inledande upphandlingsfasen så sker kommunikationen i form av skriftliga och svar. Dessa distribueras till samtliga anbudsgivare.

När entreprenör valts så hålls ett anbuds möte. På dessa möten ventileras inga teknikfrågor

Byggfas

Vid start av projektet hålls ett startmöte och där deltar representanter för:

- Beställare (ex. projektledare, byggledare, tekniska specialister m.fl.)
- Projektören
- Entreprenören

På mötet avhandlas vanligen inte så många teknikfrågor, men det borde vara möjligt att övergripande ta upp och betona vikten av inläckagemätningar, med hög kvalitet.

Hur mätsystemet skall byggas och hur mätningar skall utföras skall framgå av kontraktet. Inför projektstart blir ibland entreprenören ibland ålagd att redovisa en plan som populärt brukar kallas "Entreprenörens vattenplan". Det är en plan där entreprenören beskriver hur de skall hantera sitt inkommande och utgående vatten. Planen skall innefatta allt från hur pumpkar ska vara konstruerade till hur man hanterar läckande slangar i tunneln och rundpumpning av vatten. När drivningen börjar ska dokumentet kompletteras med en planritning som visar alla ingående delar i entreprenörens vattensystem, både för inkommande och utgående vatten. Ex. på ingående komponenter kan t.ex. vara ledningar för utgående och inkommande vatten, vattenuttag i tunneln, försedimenteringbassänger, pumpgruppar, mätvallar, vattenmätare osv.

Under byggets gång hålls periodiska; bygg- ekonomi- och produktionsmöten. På produktionsmötena deltar representanter från både beställare och entreprenörer, och på dessa kan frågeställningar tas upp av typ detaljutformning av mätanordningar samt skötsel av utrustningen. Eventuella nödvändiga beslut på produktionsmötena tas av byggledaren i samråd med de tekniskt ansvariga.

Under de inledande mötena bör ändå beställare och entreprenör i detalj gå igenom hur mätsystemet skall byggas upp och hur mätningar skall göras. Om en av beställaren godtagen s.k. "vattenplan" finns framtagna, så förs diskussionerna utgående från denna. Även på de följande mötena är det viktigt att beställaren eller beställarens representant kontrollerar att överenskommelserna efterlevs. Om "vattenplan" finns framtagna så bör uppdaterad "vattenplan" också vara en stående punkt på byggmötesagendan.

Projektavslut

Ett erfarenhetsåterföringsmöte hålls mellan beställare och entreprenör i samband med avslut av projektet. För att komma vidare med utvecklingen av bra effektiva metoder för mätning av inläckage, så är det viktigt att göra en detaljutvärdering av installerade mätsystem och gjorda mätningar.

1.2 Sammanställning över exempel på nuvarande och tänkbara framtida krav angående mätning av inläckage till tunnlar.

När beställaren utformar sina arbetshandlingar så måste miljödomar beaktas. Arbetshandlingarna utformas även utgående från vilken nödvändig information som behövs under bygg- och ibland även under driftskeden. Uppgifterna kan exempelvis bl.a. användas för beslut om och i så fall var efterinjektering skall göras.

De handlingar som utarbetas under projekteringsfasen bör innehålla tydliga direktiv angående bl.a. följande:

- Intentionen med mätningarna.
- Hur tidigt mätningar skall påbörjas.
- Var mätningar skall göras (det bör dock finnas möjligheter att flytta mätvallar beroende på bergkvaliteten på den förutbestämda platsen).
- Vilken typ av mätanordning som skall användas, alternativt att entreprenören skall presentera ett mätkoncept involverande mätanordningar, som skall godkännas av beställaren.
- Hur eventuell mätvallar avtätas mot berg.
- Om och i så fall hur mätningar av dränerings- och dagvatten separeras.
- Avledning av dräneringsvatten.
- Utformning av eventuella infiltrationsanläggningar.
- Hur ofta mätningar skall göras, samt hur mätningar skall avrapporteras.
- Skötsel- och kalibreringsinstruktioner.

1.2.1 Allmänna krav och anvisningar

De tunnelanläggningar som byggs för Vägverkets räkning görs i enlighet med de krav och anvisningar som finns angivna i Tunnel 2004. BV Tunnel är motsvarande handling för Banverket. Dessa handlingar är de två verkens främsta styrmedel för att efterfölja de lagar som utfärdats av Miljödomstolarna och dom övriga krav som verken har på sina anläggningar.

Nedan presenteras några citat över krav uppställda i avsnittet 3.2.3 i Tunnel 2002, angående vatteniläckage.

3.2.3 Bärförmåga, stadga och beständighet, Krav, Vattentäthet

”Tunnel skall vara tillräckligt tät mot vatteninläckning. Kravet på täthet utgår från eftersträvd tunnelmiljö och risk för omgivningspåverkan.

Geohydrologisk utredning skall utföras.

Risk för omgivningspåverkan bestäms utifrån geohydrologisk utredning, eventuell stabilitetsutredning och eventuell vattendom.

Krav på mängd inläckande vatten utifrån dessa utredningar skall vara angivet i den tekniska beskrivningen.

Påverkan på omgivningen, såsom grundvattensänkning i anslutning till tunneln kan vara så omfattande att marksättningar och andra skador kan uppstå.”

3.4.3.2 Bärförmåga, stadga och beständighet, Bergtunnel, Verifiering, Vattentäthet

”Inläckage skall minimeras. Rinnande vatten på tunnelvägg skall inte förekomma.

Skadlig omgivningspåverkan för bergtunnel motverkas i första hand genom injektering och i andra hand genom infiltration eller en vattentät konstruktion. Eftersträvad tunnelmiljö uppnås i första hand genom injektering och i andra hand genom bortledning av vatten med dräner eller inntak/takkonstruktioner. Bortledning av vatten och infiltration är metoder som ökar driftkostnaderna och val av metod bör göras efter analys av livscykelkostnader.

Bestämning av typ, omfattning, utförande etc. för injekteringsarbeten ska göras enligt SS-EN 12 715 med den ändringen att hänvisningen till ENV 1997-1:1994 ändras till kapitel 2 och avsnitt 3.1 – 3.4.

Vid projekteringen av injekteringen utreds och beskrivs de alternativa metoder som täcker in de variationer i bergförhållanden som rimligen kan tänkas förekomma vid det aktuella projektet.”

3.4.6.3.5 Bärförmåga, stadga och beständighet, Bergtunnel, Kontroll, Fortlöpande provning avseende material och utförande, Tätningsåtgärder

”Kontroll av injekteringsarbeten ska utföras enligt SS-EN 12 715 och en godtagen kontrollplan för tilläggskontroll.

I den tekniska beskrivningen anges vilka kontroller enligt SS-EN 12 715 som minst ska utföras.

I den tekniska beskrivningen anges också eventuella ytterligare krav på uppföljning och kontroll som föranleds av valt tätnings-/vattenavledningskoncept med tillhörande krav på säkerhet mot frysning enligt avsnitten 3.2.3 och 3.2.4.”

1.2.2 Exempel på uppställda krav för tunnlar byggda under senaste tio åren

För att få en översikt över de krav som ställts angående inläckage till tunnlar gjorde Geosigma.AB år 2009 en enklare genomgång av några tunnlar som byggts under de senaste 10 åren.

Uppgifter inhämtades från;

- personer som ansvarat för eller varit delaktiga i inläckagemätningar
- beställarnas hemsidor, samt övrig information på nätet
- utvärderingsrapporter
- miljödomar.

Uppgifter erhöles från följande tunnlar:

- Äspötunneln (Svensk, sprängd tunnel, forskning för lagring av kärnavfall)
- ONKALO-tunneln (Finsk, sprängd tunnel, delvis forskning för lagring av kärnavfall)
- Hallandsåstunneln (Sprängd och fullortsborrad järnvägstunnel)
- Citytunneln (Fullortsborrad järnvägstunnel)
- Ådalsbanan (Sprängda järnvägstunnlar)
- Norra Länken (Sprängd vägtunnel)
- Södra Länken (Sprängd vägtunnel)
- Löttingetunneln (Sprängd vägtunnel)
- Törnskogstunneln (Sprängd vägtunnel)
- Ledningstunnel i Stockholm (Sprängd tunnel)

Vidare har viss översiktlig information inhämtats från LKAB, Boliden, SL (Tunnelbanetunnlar) samt från militära anläggningar.

Utgående från den framtagna informationen så har det gjorts en översiktliga sammanställning över uppställda krav i miljödomar och arbetshandlingar. Kraven när det gäller inläckage i tunnlar är utformade olika beroende på var tunneln är belägen. Ibland har det funnits ett krav för byggskedet och ett annat krav när tunneln tagits i drift.

Exempel på kravbild:

- En del tunnlar har inte haft några restriktioner.

- En tunnel hade bara restriktion när det gällde avsänkning av grundvattenytor i omgivningarna till tunneln,
- Exempel på krav som varit skrivna i miljödomar och arbetshandlingar redovisas nedan;
 - För hela tunnelsträckningen så får ej inläckaget var större än X_1 L/min per 100 m när tunneln är färdig
 - För hela tunnelsträckningen så får ej inläckaget var större än X_1 L/min per 100 m under byggnationen och X_2 L/min per 100 m när tunneln är färdig.
 - För tunnelsträckningen S_1 så får ej inläckaget var större än X_1 L/min per 100 m och för S_2 så får ej inläckaget var större än X_2 L/min per 100 m under byggnationen. Andra flödesvärden fanns ibland angivna för färdig tunnel.
 - Högsta antalet pumpbrunnar i anslutning till byggproparna är Z st och återinfiltrationen skall göras i brunnar i ca. B st brunnsområden. Under byggskedet så får man från uttagsbrunnarna bortleda en maximal vattenmängd på Q_1 m³/h som ett rullande tremånaders medelvärde, dock högst Q_2 m³/h, båda som riktvärden, för sänkning av grundvattentrycket till H_1 mvp under schaktnivå och lägst till $-H_2$ m. Under byggskedet återinfiltreras erforderliga mängder uppumpat grundvatten i infiltrationsbrunnar så att påverkan i kalkberggrunden utanför angiven influensradie blir mindre än $\pm H_1$ m. Motsvarande skrivningar finns även under driftskedet.
- Krav angående avstånd mellan mätvallar var angivna från 100 m och uppåt .
- I vissa tunnlar fanns krav på att mätvallar skulle kontakt- och ridåinjekteras.
- Beställaren har ibland i sina arbetshandlingar satt hårdare krav mot entreprenören än de som står i miljödomen.

Ovan nämnda krav kan vara satta för tunnlar eller för ett tunnelrör.

Av de i studien involverade tunnlar så är det bara i två tunnelavsnitt som läckagekraven är satta så lågt som 1-1.5 l/min och 100 m tunnel eller tunnelrör. Det har dock funnits andra tunnlar där kraven legat något under 1 l/min och 100 m tunnel.

I en annan tunnel så fanns det ett krav på att inläckaget vid en viss fastighet inte fick vara mer än 3 l/min och 100 m tunnel. (sträckan var ungefär 100 m lång).

Exempel på krav när det gäller avrapportering mätdata:

- Momentanvärden
- Typvärden
- Årsmedelvärden
- Rullande månadsmedelvärden

1.2.3 Krav på påbörjade, planerade och framtida tunnlar

Exempel på krav eller diskuterade krav för planerade eller påbörjade tunnlar

På Citybanan som sträcker sig genom flera varierande förhållanden och med ett stort antal skadeobjekt är kraven också högre än normalfallet, med exempelvis fler uppdelningar i delsträckor. För Förbifart Stockholm hade ansökningshandlingarna ännu inte lämnats in, när denna rapport skrevs. Kraven kommer troligtvis att hamna i nivå med Citybanan, men eftersom tunneln inte ska konstrueras i en lika tätbebyggd del av Stockholm är det dock möjligt att uppdelningen av mätområden blir mindre omfattande. De villkor som miljödomstolen fastställer kommer i första hand efterföljas genom tätningsåtgärder och i andra hand med hjälp av skyddsinfiltration till grundvatten, vilket är normalt förfarande vid de flesta tunnelbyggen.

Funderingar angående framtida krav i perspektivet 5-10 år, när det gäller inläckage till tunnlar

I några intervjuer med branschfolk har det framkommit att vid ansökningar om vattenverksamhet ligger tyngdpunkten fortfarande i princip oförändrad mellan att hantera inläckage i tunnlarna och att hantera den omgivningspåverkan som tunneln medför.

Den generella inställningen från myndigheter och allmänhet är ändå att frågor rörande inläckage skall prioriteras och hårdare krav införs på tunnelbyggen. På exempelvis Citybanan har läckagekraven angetts från Miljööverdomstolen som ett begränsningsvärde istället för det mer använda riktvärdet. Oavsett vilket av värdena som används så är överträdelser straffbara. Dock kan överträdelser mot riktvärden bedömas lindrigare om kraftåtgärder tas för att förhindra att överträdelser upprepas. Införandet av begränsningsvärden har ännu inte fått fullt genomslag och många miljödomar utformas fortfarande som riktvärden. Vid drivning av tunnlar i känsliga områden i exempelvis stadsmiljö kommer begränsningsvärden att bli allt vanligare.

Krav angående redovisning mätosäkerheter har hittills inte funnits med i vare sig miljödomar eller arbetshandlingar, möjligen kan sådana krav komma i framtiden. Ibland antas att mätosäkerheten blir tillräcklig bra om den i handlingarna föreslagna mätmetoden används. Med alla de processer som pågår i en tunnel där vatten är involverat, så är det inte enkelt att skatta mätosäkerheter. För tunnlar eller tunnelavsnitt där de maximala inflödena är satta mycket låga ($\leq 1\text{L}/\text{min}$ per 100m) så kan relativa felen bli relativt höga, se avsnittet 2.

Planerade nya svenska direktiv eller EU-direktiv

Då Vägverket och Banverket slagits ihop den 1:a april år 2010 kommer också deras respektive anvisningar i läckagefrågor att sammanställas i två gemensamma dokument. Dessa kommer att vara i form av Tekniska Krav Tunnel, samt Tekniska Råd Tunnel.

Skillnaden från föregående handlingar kommer dock inte vara märkbara vad gäller inläckagefrågor då fokuset legat på att få ihop ett gemensamt dokument. Den skillnad som ändå blir är att verksamhetsutövaren behöver presentera beräkningar som visar att denne klarar de uppsatta kraven, vilket inte var nödvändigt tidigare.

År 2009 kom nya direktiv från EU. De innehöll minimala skrivningar rörande inläckage. Utöver ovan nämnda direktiv så verkar inga nya internationella anvisningar utkommit som går att applicera på våra svenska förhållanden.

1.3 Kapitel 1, sammanfattning

För att bedriva en vattenverksamhet som kan tänkas uppstå vid byggnation av tunnlar så görs en prövning enligt 11 kapitlet i miljöbalken. Underlagsmaterialet som lämnas till domstolen bör vara gediget och bl.a. innehålla förslag på tillåtna inläckage, baserade på en hydrogeologisk utredning och en miljökonekvensberskrivning. Under tillståndsprövningen vid miljödomstolen, så skall den sökande visa att han kan övervaka och kontrollera verksamheten. I det ingår bl.a. även att visa att mätningar av inläckage kommer att göras med vederhäftiga metoder. Detta kan klargöras i ett utkast till ett kontrollprogram. Utkastet kan vara ett levande dokument under bygg- och driftskedet. Detta möjliggör att exempelvis Länsstyrelsen vid behov kan begära kompletteringar eller justeringar i programmet.

Olika typer av krav när det gäller inläckage till tunnlar uppställs dels av myndigheter för att minimera miljöpåverkan av omgivningen och dels av tunnelägaren för att minimera påverkan på miljön och installationer i tunnlar.

Övergripande anvisningar och krav för tunnelbyggnad har utfärdats både av Vägverket (Tunnel 2004) och Banverket (BV Tunnel). Två nya övergripande dokument tas fram år 2010 i och med att verken slogs samman till Trafikverket. Dessa har benämnts Tekniska Krav Tunnel och Tekniska Råd Tunnel. En av skillnaderna relativt tidigare dokument är att verksamhetsutövaren behöver presentera beräkningar som visar att denna klarar uppsatta krav, vilket inte var nödvändigt tidigare.

År 2009 kom nya direktiv från EU med anknytning till tunnlar. De innehöll få skrivningar rörande inläckage. Däremot fastslås att även små organisationer får föra talan i Miljödomstolen. Det innebär att beställaren kan behöva öka sina resurser för att driva igenom projekt. Utöver dessa direktiv så har inga internationella anvisningar utkommit som går att applicera på våra svenska förhållanden.

Ett tunnelprojekt inleds bl.a. med projektering. Detta arbete utmynnar i en rad handlingar, omfattande bl.a. geologiska och hydrogeologiska förhållanden, ritningar, beräkningar och utredningar, arbetsbeskrivningar och kontrollplaner.

De handlingar rörande inläckagemätningar som utarbetas under projekteringsfasen skall innehålla tydliga direktiv som bl.a. bör omfatta följande:

- Intentionen med mätningarna
- Hur dag- och dräneringsvatten skall separeras
- När Hur tidigt mätningar skall påbörjas

- Var mätningar skall göras (det bör dock finnas möjligheter att flytta exempelvis mätvallar beroende på bergkvaliteten på den förutbestämda platsen)
- Vilken typ av mätanordning som skall användas, alternativt att entreprenören skall presentera ett mätkoncept involverande mätanordningar, som skall godkännas av beställaren.
- Hur ofta mätningar skall göras, samt hur mätningar skall avrapporteras.
- Skötsel- och kalibreringsinstruktioner

Handlingarna kan också innehålla skrivningar om konsekvenser i det fall inte direktiven följs.

Under byggfasen hålls flera typer av möten (bl.a. start-, bygg -och produktionsmöten) mellan bl.a. produktionsledning och entreprenören. På dessa möten bör frågeställningar rörande inläckagemätningar ventileras och kontroller utföras att överenskommelser följts.

För att komma vidare med utvecklingen av bra och effektiva metoder för mätning av inläckage, så är det viktigt att det görs en detaljutvärdering av installerade mätsystem och gjorda mätningar inför erfarenhetsåterföringsmötet vid projektavslut.

Kravbilderna (gällande tillståndsgivna vattenverksamheter) på olika tunnlar byggda under de senaste tio åren har varierat, bl.a. beroende på typ av tunnel och var tunnelarna är belägna. Exempel:

- Inga restriktioner
- Enbart restriktioner när det gäller grundvattenytor i omgivningar
- Maximalt tillåtna inflöde för hela tunneln under driftfasen
- Maximalt tillåtna inflöden till hela tunneln, under bygg- och driftfasen.
- Maximalt tillåtna inflöden för tunnelavsnitt och hela tunnlar under bygg- respektive driftfas
- Maximalt tillåtna inflöden för tunnelavsnitt och hela tunnlar under bygg- respektive driftfas, kopplade till tillåtna förändringar av grundvattenytor
- Avstånd mellan mätvallar.
- Typ av avtätning under mätvall.

Kraven för de kommande 5-10 åren förväntas inte förändras så mycket. Tyngdpunkten antas bli oförändrad mellan att hantera inläckage i tunnlar och att hantera omgivningspåverkan utanför tunneln. Inläckagefrågor kommer att prioriteras ytterligare. Tidigare betraktades angivna krav i miljödomar som riktvärden. I framtida domar kommer begränsningsvärden att bli mer vanliga. Eventuella överträdande av dessa är straffbara.

2 Utredning om svårigheter att mäta flöden i tunnlar där maximala inläckage är satta mycket låga

2.1 Beskrivning av mätanordningar som använts i tunnlar där inläckagen inte får överskrida ca. 1L/min per 100 m tunnel

Mätmetoder och mätutrustningar i tunnlar där kraven på inläckage varit maximerade till ca. 1 L/min per 100m, verkar inte ha skilts sig så mycket från de tunnlar där tillåtna läckage varit satta högre.

Däremot har mätmetoder anpassats för de låga flödena. I exempelvis Lundbytunneln i Göteborg gjordes sektionsvisa mätningar under byggskedet. Mätvallarnas täthet säkerställdes genom att schakta bort berget nerströms vallen för att kunna kontrollera eventuella läckage när vatten fylldes på uppströms vallen. Flödesmätningarna från utloppsledningen på mätvallen gjordes med hjälp av små mätkärl och stoppur, vid upprepade tillfällen. Periodvis gjordes även mätningar med summerande flödesmätare.

Mätningar av totala inflöden till tunneln under byggskedet gjordes på måndagsmorgnar när det inte varit några aktiviteter i tunneln under helgen och när allt inkommande processvatten varit avstängt. I samband med mätningarna gjordes även inspektion av ledningsskarvar.

Under driftskedet mättes totalflödet i pumpstationen och mätvärden avrapporterades till driftcentralen.

I anslutning till mätvallarna så mättes även vattentryck i ett avmanschetterat borrhål.

2.2 Skattning av olika vattenflöden som kan påverka mätningar av inflöden i tunnlar där läckagekraven är satta mycket höga

Ett flertal faktorer kan få stor påverkan på mätosäkerheten på mätvärden vid bestämningar av inläckage i en tunnel eller tunnelavsnitt, om gränsvärdena för inläckage är satta låga. Exempelvis

- Vattentransporter via ventilationssystem, se avsnitt 2.2.1.
- Vattenförbrukning under byggfasen (borrning, spolning mm), se avsnitt 2.2.2.
- Vattentransport via fordon, se avsnitt 2.2.3.
- Läckage i ledningar och ventiler, se avsnitt 2.2.4.
- Vatten som kommer in via tunnelmynningar, se avsnitt 2.2.5
- Läckage i och under mätvallar, se avsnitt 2.2.6

- Temporära inläckage i uppborrade i injekteringsskärmar och bulthål, se avsnitt 2.2.7

I rapporten används termerna; mätnoggrannhet, noggrannhet och mätosäkerheter vid diskussioner av olika typer felbestämningar. Innebörden av dessa termer i denna rapport är:

Noggrannheten (eng. accuracy) . Värden som kan hämtas från tillverkarens datablad för de olika mätarna. För hela mätområden anges noggrannheten vanligen som +/- ett procenttal av mätområdet och kan innefatta ex; linjaritet, hysteresis och reperterbarhet, under vissa mätbetingelser (ex inom ett visst temperaturområde).

Mätosäkerheten beror både av mätmetodens och av mätutrustningens egenskaper. Nedan görs ett försök till en förenklad beskrivning hur ett förfarande kan gå till för skattning av mätosäkerheter på mätstorheter:

- Sammanställning av samband mellan ingående parametrar som används för att ta fram aktuellt mätvärde. (Gäller underlagsformler mm som används för beräkning av mätvärdet eller som används för kalibreringsreferensen)
- Skattning av värden på ingående storheter samt deras standardavvikelser. (En del av dessa uppgifter kan tas från produktblad från leverantörer. Skattning av standardavvikelser görs utgående från lämpliga fördelningsfunktioner)
- Bestäm känslighetsfaktorn till varje osäkerhetsbidrag (Det kan exempelvis vara storleken av mätvärdets förändring vid en förändring i loggerns insignal)
- Beräkning av mätningens sammanlagda mätosäkerhet. (Detta görs vanligtvis i ett excelark och baseras på det som framtagits i punkterna ovan)
- Ta fram en täckningsfaktor och redovisa den utvidgade mätosäkerheten. (Täckningsfaktor väljs så att man erhåller önskad täcknings sannolikhet. Om man exempelvis önskar att 95 % av uppmätta värden ligger inom intervallet så väljs den till 2 (vid en normalfördelad storhet))
- Mätvärdet redovisas tillsammans med den utvidgade mätosäkerheten (Exempelvis 1.35 +/-0.05 kg)

Mätosäkerheter tilldelas vanligtvis enbart enskilda mätvärden. För att få en uppfattning om en mätseries mätosäkerhet i ett visst mätintervall i det aktuella mätuppdraget, så kan skattningar göras på exempelvis för 2-5 olika mätvärden. Om uppdragsgivaren av någon anledning bara önskar redovisning av ett värde på mätosäkerheten för den aktuella mätperioden så kan kanske den högsta mätosäkerheten redovisas.

I texten används ordet mätosäkerhet inte helt stringent de skrivningar som anges i de definitioner som redovisas i SIS, svensk standard SS020106.

2.2.1 Fuktvandring via ventilationssystem

Antaganden och beräkningar

I tunnlar kan vissa vattenflöden genereras via ventilationen. När kall torr luft körs in i tunneln under vintern så värms den upp något i tunneln, varvid utgående luft kan plocka med sig fukt från tunnelns väggar, tak och golv. Motsatta förhållanden gäller

sommartid. Ventilationsluften som då kommer in är varm och fuktig och avkyls i tunneln, varvid vatten kan kondensera på väggar mm.

I bilaga A redovisas gjorda skattningar över vattenflöden in till och ut ur 1 km långa fiktiva tunnlar vid två olika årstider, januari och juli. Kalkylerna har gjorts för tre platser med olika klimatzoner. Vissa uppgifter utanför tunnlar (lufttemperatur och luftfuktighet i form av daggpunktstemperaturer) har hämtats från SMHI. Då det saknats mätvärden på övriga parametrar, så har dessa fått gissats. Vidare har antagits förhållandena (temperaturer, avdunstning och kondensation) är lika längs hela tunnelsträckningen.

Tunneltemperaturer under sommaren har antagits vara ute temperaturer minskade med 10 °C.

Tunneltemperaturer under vintern har antagits vara ute temperaturer ökade med 10 °C.

Under byggskedet har luftflödet ansatts till 50 m³/s i en tunnel med en tvärsnittsarea på 70 m² (Franzen 1983).

Under driftskedet har luftflödet ansatts till 400 m³/s i en tunnel med tvärsnittsarea på ca 70 m². Största delen av ventilationen ombesörjs av biltrafiken. I Tingstad tunneln i Göteborg med en tvärsnittsarea på ca 70 m² har vindhastigheter mätts till 7 m/s vid enkelriktad trafik. Detta skulle ge ett luftflöde på 490 m³/s. Luftflöden med dubbelriktad trafik är mycket lägre.

Resultat

Den beräknade vattentransporten (kondensering) in till en tunnel under juli respektive vattentransporten (avdunstning) ut ur en tunnel under december presenteras i Tabell 2.1, för både bygg- och driftskeden.

Tabell 2-1 – Vattentransport vid antagna luftflöden och tunnelareor för bygg- och driftskeden.

Område	Januari			Juli		
	X ¹ (l/m ³)	Byggskede (l/ min per 100m,)	Driftskede (l/ min per 100m,)	X ² (l/m ³)	Byggskede (l/ min per 100m,)	Driftskede (l/ min per 100m,)
Jokkmokk	0,0032	1,0	7,7	0,0017	0,5	4,2
Skellefteå	0,0049	1,5	11,7	0,0020	0,6	4,8
Jönköping	0,0045	1,4	10,9	0,0017	0,5	4,1
Göteborg	0,0061	1,8	14,7	0,0017	0,5	4,2

¹ Vattenvolym per m³ ventilationsluft som avdunstar i tunneln

² Vattenvolym per m³ ventilationsluft som kondenserar i tunneln

Resultaten från utförda skattningar av vattenflöden via ventilationssystem visar inga större skillnader sommartid mellan orter med varierande uteluftstemperaturer och luftfuktighet. Vintertid så är skillnaderna större.

Under byggskedet sommartid, så beräknades vattenflödet via ventilationssystemet in till tunneln till ca. 0,5 L/ min per 100m tunnel. Detta vatten går till dräneringssystemet och kan påverka mätningarna vid låga dräneringsflöden.

Under byggskedet vintertid kan fukten som förs ut med ventilationen dels utgöras av det processvatten som används vid borrhning och spolning, dels av inläckande vatten till tunneln. Det utventilerade vattnet kan motsvara ett flöde upp till ca 1,5 L/ min per 100m tunnel. Detta är ett maximalt värde som förutsätter att det hela tiden finns tillgängligt vatten i tunneln som kan avdunsta, så att relativa fuktigheten blir 100 % på den utgående luften. Det är svårt att skatta hur stor andel av detta vatten som utgör inläckage till tunneln. Kanske kan ett flöde på upp till ca. 0.5 L/ min per 100m utgöras av vatten från inläckaget.

Under driftskedet sommartid kan ett vattenflöde på upp till ca 4 L/ min per 100m komma in till tunnlar via ventilationen. Om tunnarna har separata system för dag- och dräneringsvatten så kommer troligen det mesta av det kondenserade vattnet att rinna till dagvattensystemet. Det som kan komma till dräneringssystemet torde motsvara ett flöde som är mindre än 0,5 L/ min per 100m tunnel.

Under driftskedet vintertid så kan vattentransporten via ventilationen ut ur tunneln motsvara ett flöde på upp till ca 11 L/ min per 100m. Detta är ett maximalt värde som förutsätter att det hela tiden finns tillgängligt vatten i tunneln som kan avdunsta, så att relativa fuktigheten blir 100 % på den utgående luften. Detta är inte troligt, men om så skulle vara fallet så kommer troligen det mesta av vattnet från vägbanan, och har transporterats dit i form av snö och is, se avsnitt 2.2.4. Små mängder kan visserligen avdunsta ifrån tak och väggar, involverande dräner. Oavsett vilka förhållanden som råder så är det svårt att bedöma andelen inläckande vatten som lämnar tunneln via ventilation. Kanske kan det motsvara upp till ca. 0,5 L/ min per 100m.

De ovan redovisade översiktliga skattningarna av flöden via ventilationen är troligen för höga men även om de reduceras så kan de få en viss betydelse om läckagekriterierna är satta så lågt som 1-2 L/ min per 100 m tunnel

Påverkan av ventilationen kan innebära att vintertid blir de uppmätta inläckande flöden till tunnlar för låga och sommartid för höga. Påverkan av ventilationen kan motsvara upp till åtminstone +/- 0.5 L/ min per 100m.

För inflödesmätningar i avsnitt av tunnlar där maximalt tillåtna inläckage är satta mycket låga, skulle flöden via ventilationssystem behöva mätas. Det är dock inte görligt att göra noggranna mätningar av vattenflöden via ventilationssystemen i alla dessa tunnlar eller tunnelavsnitt. Det behöver därför tas fram tumregler (normvärden) hur ventilationsflödena skall skattas. För detta borde detaljerade mätningar göras i några tunnlar som skulle kunna användas som underlag för att utforma tumreglerna. De skattade flödena skulle sedan kunna ingå i felgränserna för de maximalt godtagna inflödena som angivits för de aktuella tunnelavsnitten, se avsnitt 2.3.

2.2.2 Vattenförbrukning under byggskeden

I en normal större vägtunnel går det åt en stor mängd vatten vid utbrytning av berg. Vatten används bl.a. till borrhning av salvhål , injektering, bultsättning samt för

avspolning av berg under och efter utlastning. För en av tunnlarna i Stockholm har medelflödet in till tunneln mätts till ca 85 L/min. Under vissa perioder kan dock flödena vara mycket högre.

Det mesta av detta vatten pumpas bort. En del vatten följer dock med vid utschaktning av berget och en delmängd av detta rinner av lastbilsflaken. Andelen som rinner av minskar med avståndet från tunneln. Detta vatten kan rinna till de mätsystem som används längs tunneln för att mäta inläckande vatten eller åter till tunneln, vilket påverkar både mätningar av inläckande vatten och totalt urpumpat vatten. Volymerna är svåra att uppskatta och beror bl.a. på tunnelns lutningar i längs- och tvärled.

2.2.3 Läckage i ledningar, brunnar och ventiler

De ledningar och ventiler som används i tunnlar är av olika typer och varierar beroende på bygg- eller driftskede. Under byggskedet används ofta PE-rör eller slang som skarvas med svetsning eller med hjälp av kopplingar. Även sk. Alveniusrör har använts i bland. Dessa rör har en fals på vardera änden. Vid skarvning sätts en spårad gummitätning över falsarna, varefter tätningen kläms åt med klammer.



Fig 2-1. Skarv på Alveniusrör

På kortare sträckor nära bormaskinerna kan även gummislang med klokopplingar förekomma. I klokopplingen finns en enklare plantätning som lätt kan skadas vid montage och demontage. De ledningar som används för urpumpning av vatten från tunneln har vanligen en innerdiameter på ca Ø110 mm. Dåligt utförda monteringar av kopplingar kan medföra läckage. Enligt flera intervjuade personer som arbetat i tunnlar så är läckage i synliga skarvar inte ofta förekommande, samtidigt saknas i allmänhet rutiner för att kontrollera skarvarna. Det är dock inte helt ovanligt att slangar börjar läcka när de blivit överkörda av fordon.

Under perioder när större läckage inte åtgärdats så kan det vara svårt att utvärdera inläckaget från berg in till en tunnel. Teoretiskt skulle det gå att kontrollera läckage på tilloppsledningar genom att avläsa flödet på tilloppsledningen när alla ventiler på utloppen är stängda. Ofta används dock mätare på tilloppsledningen anpassad för stora flöden, vilket innebär att den inte är tillräckligt noggrann för kunna urskilja små läckage. Motsvarande gäller även ledningen för utpumpat vatten.

Utgående från resonemanget ovan så går det inte att ange några normalt förekommande värden på läckage. Det är dock viktigt att det finns ett kontrollprogram för slangar och ledningar, främst i de tunnelavsnitt där inläckagekraven är lågt satta.

Under driftskedet i nyare tunnlar med separata dagvatten- och dräneringssystem, så kommer eventuella ledningsläckage ovan vägbanan att komma till dagvattnet. Medan läckage i ledningarna under vägbanan går till dräneringssystemet. Om en exempelvis en dagvattenledning börja läcka i ett tunnelavsnitt där endast låga inläckage tillåts, så kan detta vatten medföra att det med dräneringssystemet beräknade inflödet blir för högt.

Dagvattenbrunnar avtätas mot vägbeläggningen med ett ytligt asfaltskikt och längre ner med en blandning av asfalt och grus, som dock inte är helt tät. Eventuella läckage i vägbeläggningen runt dagvattenbrunnar eller i sprickor i vägbeläggningen kan medföra att en del av vattnet på vägbanan tillförs dräneringsvattnet, vilket därmed kan påverka mätningar av inläckage.

Rör från dräner och inklädnader kan sättas igen. Detta kan få till följd att ledningarna ner till dräneringslagret kan börja läcka så att en del av detta vatten kommer ner på vägbanan, och vidare till dagvattensystemet. Det innebär att det uppmätta inläckaget kan bli för litet i den aktuella sektionen. Dessa läckage är små och torde inte vara vanliga. Problemet kan minimeras med hjälp av kontroller och periodiska spolningar av rör.

I äldre tunnlar som kan sakna dagvattensystem kan det läckande vattnet från ledningar komma ner till dräneringssystemet och där förorsaka att uppmätta inläckage till tunneln blir för höga. Troligtvis är detta ändå inget stort problem vid mindre ledningsläckage, då kraven i dessa tunnlar inte är lika höga som i nyare tunnlar.

2.2.4 Vattentransport via fordon

Den trafik som vintertid under byggskedet kommer in i tunnelarna kan föra med sig snö på flak, däck och under stänkskärmar. Även sommartid kan vatten komma in i tunnlar via fordon. Frekvensen på inpassering av fordon är dock mycket låg varför detta vatten kan ignoreras. Vattentransport ut ur tunnlar via byggtrafik diskuteras även under avsnittet 2.2.2.

Under driftskedet en normal torr sommardag, är vattentransporten via fordon in till tunnlar mycket begränsad, medan det vintertid kan föras in större mängder via snö som ligger på biltak eller som samlats upp i stänkskärmar. Under en regnig sommardag kan nederbörden vara stor, men mängden vatten som förs in via bilar ändå mindre än vad som kan föras in i tunneln som snö.

I räkneexemplet nedan har antagits att tunneln är 1,0 km lång och belägen i tätortsmiljö med en dygnstrafik på 30 000 fordon/dygn. Vidare bedöms varje fordon avge i snitt 0,5 liter vatten in till tunneln.

Total införd vattenvolym är = $30\,000 \cdot 0,5 = 15\,000$ liter/dygn

Omräknat blir det = $15\,000 / (10 \cdot 60 \cdot 24) = 1$ liter/min och 100 m.

I det fall att tunneln har separata system för dag- och dränvatten kommer det mesta av detta vatten att tillföras dagvattenssystemet. En mindre del av kan dock komma till dräneringsvattnet via läckage i anslutning till dagvattenbrunnarna, se avsnitt 2.2.3. Denna andel borde vara mindre än 10 % av det vatten som kommer in via fordonen.

2.2.5 Vatten som kommer in via tunnelmynningen

Upptagningsarean för det smält- och regnvatten vatten som rinner in i tunnlar via tunnelmynningarna kan ibland vara stor, vilket kan generera relativt stora inflöden vid skyfall eller längre regnperioder. Om det exempelvis under två timmar regnar 25 mm i ett upptagningsområde på 500 m² så motsvarar det ett medelflöde på ca 100 L/min under den aktuella perioden. Detta vatten bör tas omhand så att det kan särskiljas från det inläckande vattnet, både bygg- och driftskeden. Vanligen installeras en mätvall vid tunnelmynningen. Denna skall naturligtvis vara utformad så att tyngre fordon kan passera och vara lätta att rensa från sand och grus.

Under byggskedet kan antingen vattnet pumpas bort från vallen upp till ytan, eller mätas och ledas vidare ner till det dike som går längs tunnelväggen. Om kumulativa mätningar görs längs tunneln under byggskedet, så kan ett stort flöde från tunnelmynningen i samband med regn, påverka mätosäkerheten i de sektionsvisa bestämningarna längs tunneln.

Under driftskedet kan vattnet ledas till dagvattenssystemet och borde därmed inte påverka inläckagemätningarna. Vattnet i dagvattenssystemet kan användas för återinfiltration, kylning eller ledas bort.

2.2.6 Läckage i och under mätvallar

Inledning

Mätvallarnas konstruktion kan variera beroende på förutsättningarna i den aktuella tunneln. Om tunnelbotten lutar mycket i sidled så kan en stor del av mätvallen endast utgöra en styranordning för vatten mot en mätare. Uppströms denna typ av vall bildas endast ett litet eller inget vattenmagasin. Vid andra förutsättningar är vallen konstruerad för att åstadkomma önskad nivåskillnad mellan vattenytorna uppströms och nedströms mätvallen, för att möjliggöra installation av en mätanordning som kräver en viss fallhöjd.

Vid flödesmätning i anslutning till en mätvall finns en rad olika faktorer som påverkar osäkerheten i mätningarna. Oavsett mätmetod (hink och klocka, överfall med nivåmätning, elektromagnetsiska flödesmätare o.s.v.) är metoden behäftad med mätfel. Ett systematiskt fel vars storlek är mycket svår att skatta är läckaget under mätvallen.

Infiltration i berget under vattenmagasinet uppströms mätvallen, dvs. läckage under vallen, drivs av det hydrostatiska tryck vars storlek är en funktion av magasinets djup. Läckagets storlek beror givetvis även av tunnelbottens hydrauliska konduktivitet (genomsläppighet). Den störda zonen närmast tunneln, som påverkats av sprängningen, kan antas ha en högre konduktivitet än omgivande berg. Den störda zonen kan också vara anisotrop med avseende på hydraulisk konduktivitet. Exempelvis går det inte att

utesluta konduktivitet längs med tunneln är högre än tvärs tunneln i den störda zonen. För tunnlar belägna under grundvattenytan beror mängden vatten som infiltrerar under magasinet även av storleken av den tryckgradient in mot tunneln som driver inläckaget.

Modellering med tillhörande antaganden

För att åskådliggöra potentiellt läckage och skatta storleksordningen på förhållandet mellan läckage under en mätvall och uppmätt flöde för ett tunnelavsnitt, samt att ge en bild av hur strömning under mätvallen kan se ut vid olika förutsättningar, har ett antal olika scenarion simulerats med den numeriska modellen Modflow.

De parametrar som varierats är:

- **Mätvallens tjocklek.** (Tjocklek; 0,3; 0,6 och 2 m)
- **Hydraulisk konduktivitet i bergmassa och störd zon** (Konduktivitet i berg: $1,0 \cdot 10^{-8}$; $1,0 \cdot 10^{-7}$; $1,0 \cdot 10^{-8}$ och $1,0 \cdot 10^{-6}$ m/s. Konduktivitet i störd zon; $1,0 \cdot 10^{-5}$; $1,0 \cdot 10^{-6}$; $1,0 \cdot 10^{-7}$; $2,0 \cdot 10^{-7}$; $3,0 \cdot 10^{-7}$; $5,0 \cdot 10^{-7}$ och $1,0 \cdot 10^{-8}$ m/s)
- **Effekt av ridåinjektering** (Konduktivitet i berg: $1,0 \cdot 10^{-8}$ och $1,0 \cdot 10^{-6}$ m/s. Konduktivitet injektering ner till ett djup på 1,5 m under mätvall, involverande störd zon och ostörda berget: $1,0 \cdot 10^{-9}$ m/s)
- **Vattennivå i vattenmagasinet uppströms mätvall.** (Magasinsdjup: 0,1 ; 0,25 och 0,50 m. Konduktivitet i berg: $1,0 \cdot 10^{-8}$ m/s. Konduktivitet i störd zon: $1,0 \cdot 10^{-6}$ och $1,0 \cdot 10^{-5}$ m/s)
- **Gradient in mot tunnel** (Gradienter in mot tunnelgolv): 0,06; 0,31; 0,56; 1,06; 3,06; 9,06 m/m. Konduktivitet i berg: $1,0 \cdot 10^{-8}$ och $1,0 \cdot 10^{-6}$ m/s. Konduktivitet i störd zon: $1,0 \cdot 10^{-6}$ m/s)

En modellstudie av det slag som genomförts har en rad begränsningar i beskrivandet av verkligheten på grund av förenklingar och antaganden (se Bilaga B). Resultatet från några av de simulerade situationerna kan med hydraulisk och hydrologisk förståelse till stor del förutspås. Icke desto mindre tillför en numerisk beräkning av detta slag en bättre förståelse för systemets dynamik. Simuleringar kan också ge stöd i var förbättringsåtgärder skall sättas in för att minska kostnader och mätosäkerheter med avseende på läckage under mätvallar.

I Bilaga B redovisas detaljer över modellkörningarna omfattande bl.a.

- Modelluppbyggnad
- Antaganden
- Diskretisering
- Randvilkor
- Modellkörningar
- Resultat

Exempel på förutsättningar och antaganden:

- Flödet har simulerats i två dimensioner genom ett 200 meter långt längdsnitt längs en tunnel med en enhetsbredd. Mätvallen placeras långt ifrån modellens sidoränder (dvs. nära mitten) för att inte påverkas av eventuella randeffekter.
- Den tvådimensionella modellen tar inte hänsyn till radiellt flöde in mot tunneln. Vid utvärdering av det simulerade läckagets storlek relativt totalt inläckaget antas inflödet till tunneln vara lika för hela tunnelarean. Dvs. det inflöden som erhålls vid simulering av en enhetsbredd extrapoleras till att gälla hela tunnelarean.
- Berget är av naturen heterogent och det är därför en grov förenkling att ersätta spricksystemet med ett homogent och isotropt kontinuum.
- Modellens övre begränsning utgörs av tunnelbotten och modellens utsträckning i vertikal led under tunnelbotten är 20 m.
- Störda zonens utbredning från tunnelbotten har antagits vara 0.6 m.
- Ingen hänsyn har tagits till eventuellt läckage i kontaktytan mellan underkant mätvall och tunnelbotten.
- Tunneln har antagits ligga under grundvattenytan och ha en bergtäckning på några 10-tals meter.

I de redovisade tabellerna nedan har införts några begrepp som har följande innebörd:

Utströmningsområde läckage. Detta avser den sträcka nedströms mätvallen där vatten som infiltrerat under magasinet åter når tunnelbotten.

Läckage per breddmeter tunnel. Detta representerar det totala simulerade ”utflödet” på sträckan som definieras som ”Utströmningsområde läckage”. Då modellen utgörs av ett snitt längs tunneln med en tjocklek av en enhetsbredd i z-led, dvs. tvärs tunneln, skall denna siffra multipliceras med tunnelns bredd för att ge en fingervisning av det totala läckaget under mätvallen.

Beräknad andel läckage under mätvall per 100 m. I resultattabellerna presenteras en uppskattning av hur stor andel av det totala beräknade flödet som utgör läckage under mätvallen. Beräkningen skall ses som en grov skattning och baseras på beräkning av totalt läckage under mätvall i en tunnel dividerat med beräknat totalt inläckage till samma tunnel på en 100 m lång sträcka.

Beräknat läckage relativt 1 L/min/100 m. Beräknat totalt läckage under en mätvall relativt ett ansatt inläckage till tunneln på 1 L/min per 100 m. Detta beräknas genom att simulerade ”Läckage per breddmeter tunnel” (se definition ovan), multipliceras med en ansatt tunnelbredd av 10 m och relateras till ett lågt tillåtet inläckage på maximalt 1 L/min per 100 m tunnel. Observera att denna beräkning gäller i de fall mätvallarnas inbördes avstånd är 100 m. Denna jämförelse mot ett ansatt värde av 1 L/min per 100 m har störst relevans för de simuleringar där bergets konduktivitet är $1 \cdot 10^{-8}$ m/s, dvs. då det ansatta maximala läckaget är ungefär lika med det beräknade.

Resultat och kommentarer

I Tabell 2-2 nedan redovisas den parameteruppsättning som används för en referenssimulering utifrån vilken variationer i parametrar görs. Vid redovisning av resultat för variationer i parametrar redovisas endast de parametrar som avviker från Tabell 2-2.

Tabell 2-2. Parameteruppsättning för referenssimulering

Parameter	Värde	Enhet
Konduktivitet i ostört berg	$1,0 \cdot 10^{-8}$	m/s
Konduktivitet i störd zon	$1,0 \cdot 10^{-6}$	m/s
Tjocklek mätvall	0,3	M
Tunnellutning	1,5	%, (m/100m)
Magasinets djup vid mätvall	0,5	m
Injektering	nej	-
Djup störd zon	0,6	m
Tryck övre rand x=0	20	m
Tryck övre rand x=200	17	m
Tryck nedre rand	40	m

Mätvallens tjocklek

Om mätvallens tjocklek ökas betyder det att gradienten minskas från magasinet till nedsidan av vallen, beroende på det längre avståndet. Detta påverkar både mängden infiltrerat vatten under magasinet och flödesmönstret. I tabell 2-3 redovisas ansatta parametrar för mätvallens tjocklek samt resultat från simuleringar.

Tabell 2-3. Förändring i läckage under mätvall vid variation i mätvallens tjocklek

Tjocklek mätvall (m)	Utströmningsområde läckage (m)	Läckage per breddmeter tunnel (L/min)	Beräknad andel läckage under mätvall per 100 m tunnel (%)	Beräknat läckage relativt 1 L/min/100 m (%)
0.3	1	0.012	5.3	12.4
0.6	0.8	0.011	4.6	10.9
2.0	0.4	0.005	2.1	5.0

För en mätvall med en tjocklek på 0,3 m så har läckaget under mätvallen beräknats till ca. 12 % av ett maximalt ansatta inflödet till tunneln på 1L/m per 100m tunnel. Även om det är möjligt att påverka läckaget under mätvallen genom att utöka mätvallens tjocklek krävs i teorin en ökning som inte ligger inom vad som kan anses praktiskt rimligt för att få en påtaglig effekt. Av tabellen framgår att läckaget minskas med bara ca 60 % om mätvallens tjocklek ökas från 0.3 till 2 m. I verkligheten kan dock en utökning av mätvallens tjocklek ge betydande effekt i de fall där en större kontaktyta mot berget stänger flödesvägar omedelbart under mätvallen. Ett mer effektivt sätt är att kontakt- och ridåinjektera mätvallen, se avsnittet ”effekt av ridåinjektering”.

Variation av hydraulisk konduktivitet i bergmassa och störd zon

Läckagets storlek och flödesmönstret under mätvallen ändras givetvis med konduktiviteten i den störda zonen, men påverkas även starkt av konduktiviteten i övriga berget. Flödesmönster och läckage under mätvallen påverkas inte bara av konduktivitetens absolutvärde i den störda zonen respektive övriga berget utan även relationen mellan dessa. Därför har konduktivitet i bergmassan och störda zonen varierats så att ett antal representativa parameteruppsättningar erhålls. I Tabell 2-4 redovisas ansatta parametrar samt resultat från simuleringar.

Tabell 2-4. Förändring i läckage under mätvall vid variation av konduktivitet i bergmassan och störd zon

Modell- körning nr	Konduktivitet berg (m/s)	Konduktivitet störd zon (m/s)	Utströmnings- område läckage (m)	Läckage per breddmeter tunnel (L/min)	Beräknad andel läckage under mätvall per 100 m tunnel (%)	Beräknat läckage relativt 1 L/min/100 m (%)
1	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	4.90	0.130	52.5	130
2	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	1.00	0.012	5.3	12
3	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	0.00	0.000	0.0	0.0
4	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-8}$	0.00	0.000	0.0	0.0
5	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$	0.45	0.002	0.8	1.8
6	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$3,0 \cdot 10^{-7}$	0.50	0.003	1.2	2.8
7	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	0.70	0.005	2.3	5.
8	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	0.30	0.007	0.3	7.0*
9	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	1.00	0.120	5.1	120*
10	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	0.00	0.000	0.00	0.0*

* Det simulerade inläckaget till tunnelavsnittet avviker från det ansatta värdet på 1L/min per 100 m tunnel.

Resultaten belyser vikten av förhållandet mellan konduktiviteten i störda zonen och det övriga berget. Vid en låg konduktivitet i berget relativt den störda zonen, kommer en mycket stor del av tryckfallet in mot tunneln att ligga över det tätare berget vilket medför ett större läckage under mätvallen, övriga förutsättningar lika.

Om konduktiviteten i störda zonen sätts lika med konduktiviteten i det ostörda berget så erhålls ett jämnt fördelat tryckfall in mot tunneln. Detta medför att om en mätvall står på en tunnelbotten med en konduktivitet på $2,0 \cdot 10^{-7}$ m/s kan ett läckage erhållas (se modellkörning 5) samtidigt som en nästan tio gånger mer genomsläpplig tunnelbotten inte har något läckage under mätvallen, beroende på konduktiviteten i det övriga berget (se körning 10). Liknande fenomen erhålls om bergets konduktivitet ökas med en tiopotens (se modellkörningarna 2 och 8). Då halveras nästan läckaget under mätvallen.

Med ett vattenmagasin med ett djup av 0,5 m och stora skillnader i hydraulisk konduktivitet mellan berg ($1,0 \cdot 10^{-8}$ m/s) och störd zon ($1,0 \cdot 10^{-5}$ m/s) så beräknades felet orsakat av läckage under mätvallen ca 130 % om jämförelse görs mot ett ansatt

maximalt inflöde till tunneln på 1 L/min per 100m tunnel. Om jämförelsen istället görs mot faktiskt beräknat inläckage till tunneln utgör läckaget ca 50 %.

Det behövs dock en skillnad på två tiopotenser i hydraulisk konduktivitet mellan berg och störd zon för att få ett läckage under mätvallen som är större än 5 % av totalt skattat inflöde, om mätvallarna står med 100 meters mellanrum.

Effekt av injektering

En ridåinjektering har simulerats genom att ett lågt konduktivetsvärde har ansatts i en bergvolym under mätvallen omfattande störda zonen och en del av det närbelägna berget. Volymens utbredning, dvs. injekterings antagna inträngningslängd och djup, är 1,5 m i x-led och 2 m i y-led. Den injekterade volymen simulerades med en hydraulisk konduktivitet på $1,0 \cdot 10^{-9}$ m/s. De varierade parametrarna och resultat redovisas i Tabell 2-5.

Tabell 2-5. Förändring i läckage under mätvall vid införande av injekterad zon

Konduktivitet injekterad bergvolym (m/s)	Konduktivitet berg (m/s)	Konduktivitet störd zon (m/s)	Utströmningsområde läckage (m)	Läckage per breddmeter tunnel (L/min)	Beräknad andel läckage under mätvall per 100 m tunnel (%)
$1,0 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	0.00	0.000	0.0

Utgående från simuleringarna går det att konstatera att en bra utförd ridåinjektering medför att läckaget under en mätvall blir mycket begränsat.

För att undersöka hur liten gradient in mot tunneln som krävs, för att ett läckage skall kunna ske under en mätvall med ridåinjektering gjordes även simuleringar där tunneln var belägen ovan grundvattenytan eller där gradienten in mot tunneln var mycket liten. Ett flöde under ridåinjekteringen kunde påvisas men detta var i princip försumbart.

Variation i vattennivå i magasin uppströms mätvall

Ett ökat magasin djup ger ett ökat hydrostatiskt tryck under magasinet och med det en ökad infiltration. Dessutom blir magasinet längre uppströms mätvallen med ökat djup, vilket också påverkar tryckförhållandena under magasinet. Simulerade magasin djup och resultat redovisas i tabell 2-6.

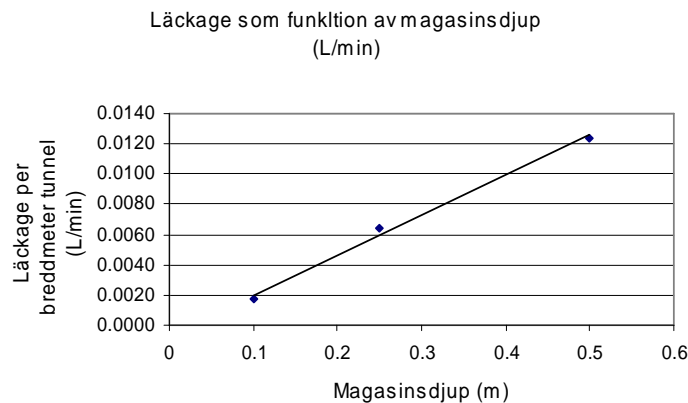
Tabell 2-6. Förändring i läckage under mätvall med varierat magasin djup

Magasinsdjup (m)	Konduktivitet berg (m/s)	Konduktivitet störd (m/s)	Utströmning sområde läckage (m)	Läckage per breddmeter tunnel (L/min)	Beräknad andel läckage under mätvall per 100 m tunnel (%)	Beräknat läckage relativt 1 L/min/100 m (%)
0.50	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	1.00	0.012	5.3	12.4
0.25	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	1.00	0.006	2.7	6.4
0.25	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	5.00	0.065	26.1	64.7
0.10	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	0.50	0.002	0.8	1.8
0.10	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	5.30	0.026	10.5	26.0

Vid de simulerade nivåerna förändras magasinets längd från ca 33 m vid nivån 0,5 m till ca 7 m vid nivån 0,1 m, under den antagna tunnellutningen. Vid jämförelse av flödesmönstren vid nivåerna 0,5, 0,25 och 0,10 m så förändras de inte i någon större utsträckning, trots stora skillnader i magasinlängd. Läckaget under mätvallen är dock starkt korrelerat till magasinets djup. I Figur 2-7 visas läckaget som en funktion av nivåförändring i magasinet vid mätvallen.

Om konduktiviteten ansätts till $1 \cdot 10^{-5}$ m/s i den störda zonen och $1 \cdot 10^{-8}$ m/s i berget, och nivån antas vara 0,25 m så kan läckaget bli i storleksordningen 60 % av ett ansatt maximalt inflöde av 1 L/min/100 m tunnel.

Om mätvallar anläggs på platser där tunneln har stor sidolutning minimeras uppbyggnaden längs vallen och därmed även läckaget. Vid simuleringar med en vattennivå av 0,1 m uppströms mätvallen med en hydraulisk konduktivitet på $1 \cdot 10^{-6}$ m/s i den störda zonen och $1 \cdot 10^{-8}$ m/s i berget så blev läckaget < 2 %, relaterat till ett ansatt maximalt inflöde av 1 L/min per 100 m tunnel, att jämföra med 12,4% för en vattennivå på 0,5m.



Figur 2-7. Läckaget är linjärt beroende av magasinets djup och påverkas mycket litet av förändring i magasinets utbredning längs tunneln. Konduktivitet i berg; $1,0 \cdot 10^{-8}$ m/s och Konduktivitet i störda zonen; $1,0 \cdot 10^{-6}$ m/s.

Variation i gradient in mot tunneln

Radiellt in mot en tunnel minskar trycket från det omgivande bergets tryck till lufttryck vid tunnelväggen. Trycksituationen i den opåverkade bergmassan är beroende av regionala och lokala spricksystem och zoner, vilka styr grundvattnets flödesmönster. Trycket i berget är generellt sett kopplat till avståndet till grundvattenytan dvs, trycket ökar med djupet, men lokala avvikelser från detta är ingen ovanlighet.

Den gradient som driver inflödet till tunneln i modellen skapas av randvilkoren på övre och nedre randen. För att få en uppfattning om hur flödesmönstret ändras under mätvallen då trycket i det omgivande berget förändras, har randvillkoret på den undre randen samt konduktivitetens värden i berg varierats. Detta finns redovisat i tabell B1-7 i

bilaga B. Variationerna skall motsvara både ytliga tunnlar med små gradienter och djupare tunnlar med större gradienter.

Vid homogena förhållanden med avseende på hydraulisk konduktivitet, dvs. konduktiviteten i berg är ungefär lika som i störda zonen så måste gradienten in mot tunneln vara mycket låg för att ett läckage skall uppstå under mätvallen.

Vid en ansatt gradient av ca 0,06 m/m kan ett läckage konstateras men detta utgör endast 0,5 % av det totala beräknade inläckaget till tunneln per 100 m eller ca 13% relativt ett maximalt ansatt inläckage på 1 L/min/100m tunnel.

För simuleringar med en störd zon med en skillnad på två tiopotenser i hydraulisk konduktivitet relativt berget, fås ett läckage för samtliga antagna gradienter i intervallet ca. 0.6 till 9.1 m/m, som mindre än ca 13% relativt ett maximalt ansatt inläckage på 1 L/min/100m tunnel.

Diskussioner

En modellstudie av det slag som genomförts har en rad begränsningar i beskrivningen av flödesförhållanden relativt verkligheten, på grund av de förenklingar och antaganden som gjorts i samband med simuleringarna. Resultatet från några av de simulerade situationerna kan med hydraulisk och hydrogeologisk förståelse till stor del förutspås. Icke desto mindre tillför en numerisk beräkning av detta slag en bättre förståelse för systemets dynamik och vilka faktorer och parametrar som är viktiga i strävan att minimera läckaget under mätvallar. Simuleringar kan också ge stöd för att ange mätosäkerheter på uppmätta inläckage till tunneln samt ge stöd för förbättringsåtgärder när det gäller mätningar med hjälp av mätvallar.

Nedan görs en del utsagor som skall tolkas som diskussionsunderlag för att utforma framtida rekommendationer.

Om man försöker att minimera kostnader vid utformning av mätvallar relativt de mätosäkerheter som kan orsakas av läckage under mätvallen så kan kanske mätvallar delas in i två typer. Den ena typen (typ A) skall kunna användas för att mäta flöden i tunnelavsnitt där det maximala tillåtna inflödet till tunnelavsnittet är satt under ca 2-3 L/min per 100 m tunnel. Den andra typen (typ B) kan användas för avsnitt av tunnlar där det maximalt tillåtna inflödet är satt över 3-4 L/min per 100 m tunnel.

Om ett tunnelavsnitt har lågt satta maximalt inläckage så måste även mätvallen i den övre begränsningen av tunnelavsnittet vara av typ A.

Ofta finns det angivna lägen för mätvallar eller avstånd mellan mätvallar i de handlingar som tas fram under projekteringsfasen. Vid senare mer detaljerade planering av lägen för mätvallar är det viktigt att utnyttja de förundersökningar (sprickfrekvens, hydraulisk konduktivitet och formationstryck) som eventuellt finns tillgängliga vid uppdateringar av tunnellägen.

Innan konstruktioner på mätvallar tas fram eller innan mätvallar placeras ut längs tunnlar är det viktigt att ha kännedom i vilka skeden mätvallarna skall användas. Vissa mätvallar kan kanske komma att användas under både bygg- och driftskeden.

Mätvallar av typ A bör/skall:

- Utformas för att enbart mäta flöden från det aktuella tunnelavsnittet. Inläckande vatten uppströms tunnelavsnittet leds längs tunneln via en sluten ledning.
- Ha väl rengjord tunnelbotten på det läge i tunneln där mätvallen skall installeras
- Kontakt- och ridåinjekteras
- Anläggas i ett tunnelavsnitt där skonsam sprängning använts (max sprängskadezon 0,3 m). Det skall vara möjligt att flytta mätvallen +/- 5m i tunnelns längsled, för att undvika eventuell sprickzon i berget. Det kan innebära att skonsam sprängning måste utföras på en sträcka på ca 10 m.
- Ha låg dämmningshöjd
- Kontrolleras med avseende på läckage. Detta kan göras genom att berget rensas nerströms mätvallen motsvarande en längd på utströmningsområdet för utläckage. Vatten fylls uppströms vallen till dämmningsgränsen, varefter eventuella läckage skattas nerströms dammen.

Mätvallar av typ B bör/skall:

- Ha väl rengjord tunnelbotten på det läge i tunneln där mätvallen skall installeras
- Åtminstone kontaktingjekteras
- Kunna förflyttas något från anvisade lägen om förhållanden på plats är ogynnsamma i form av allmänt uppsprucket berg, eventuell sprickzon eller extrema sprängskador.
- Ha så låg dämmningshöjd som möjligt, relaterat till de fallhöjder som är nödvändiga för aktuell flödesmätare.

2.2.7 Temporära inläckage i uppborrade injekteringsskärmar och bulthål

Uppborrade injekteringsskärmar eller bulthål kan under kortare perioder läcka in relativt stora mängder vatten. Är hålen borrade för förinjektering så kommer vattnet ut nära tunnelfronten. Är hålen borrade för efterinjektering så kan vattnet komma ut i någon sektion en bit från tunnelfronten. Man bör i samband mätningar göra noteringar om detta, så att avvikande mätvärden kan förklaras eller ignoreras.

2.3 Förslag på redovisning av mätvärden från tunnelavsnitt där maximal inläckage inte får överskrida 1L/min per 100 m tunnel

Krav har i miljödomar och arbetshandlingar uppställts för maximalt tillåtna inläckage till tunnelavsnitt på så låga värden som 1 L/min per 100 m tunnel. Alla berörda har nog inte insett konsekvenserna ur mätteknisk synpunkt, av så lågt satta maximala inflöden.

Ibland har nog inte antalet värdesiffror beaktats när värdena fastställts. Antalet värdesiffror kan få betydelse för tolkning av tillåtna mätosäkerheter.

Värdena har vanligen varit riktvärden men i framtida tunnlar kommer troligen begränsningsvärden att bli mer vanliga. Överskridelser av båda värdena är straffbara, men överskridelser mot riktvärden kan bedömas lindrigare.

Om tvister uppstår, hur skall exempelvis entreprenörer eller andra mätansvariga kunna bevisa att de uppmätta flödena inte överskrider det uppsatta kravet, utan att extrema mätinsatser utförs?

Även om det är mycket svårt att mäta så låga inläckage så kommer motsvarande krav att uppställas även för framtida tunnlar.

För att begränsa mycket omfattande mätinsatser så bör branschen komma till ett förfarande hur man skall hantera de olika typerna av ”ovidkommande flöden” som kan tänkas ge bidrag till mätosäkerheten i uppmätta inläckagevärden.

Nedan ges ett förslag på arbetsförfaranden som kan användas som underlag vid framtida diskussioner angående mätning och redovisning av mätvärden i tunnelavsnitt där de maximalt tillåtna inläckagen är lågt satta..

Redan i projekteringsfasen bör en mätosäkerhetsanalys göras på förväntade mätstrategier i projektet. I en mätosäkerhetsanalys kvantifieras samtliga felkällor och resultatet erhålls i form av ett värde på den totala mätosäkerheten. Om mätosäkerheten inte ligger på acceptabel nivå så kan gjord analys utnyttjas för att konstatera var förbättringsåtgärder effektivast skall sättas in, för att totalfelet skall minska.

I samban med redovisning av uppmätta inläckage under bygg-eller driftskedet så görs bedömningar av mätosäkerheter. Dessa görs inte för enskilda värden utan för en mätperiod. Bedömningarna kan baseras på; mätningar, skattningar och framtagna normvärden för de faktorer som kan tänkas påverka den totala mätosäkerheten i de aktuella tunnelavsnitten.

Att sådana bedömningar görs borde innebära att den organisation som är ansvarig för redovisade inläckagevärden kontinuerligt försöker att minska på de faktorer som kan påverka den totala mätosäkerheten. Exempelvis; läckage i ledningar och ventiler, läckage under mätvallar, inläckage via icke pluggade borrhål samt kalibreringar av flödesmätare.

I avsnittet 2.2 har det tagits upp en del faktorer som kan påverka mätosäkerheten på mätta inflödesvärden. Dessa har omfattat:

- Vattentransporter via ventilationssystem.
- Vattenförbrukning under byggfasen (borrning, spolning mm).
- Vattentransport via fordon.
- Läckage i ledningar och ventiler.
- Vatten som kommer in via tunnelmynningar.
- Läckage i och under mätvallar.
- Temporära inläckage i uppborrade i injekteringskärmar och bulthål.

I avsnittet redovisas skattningar över storleksordningen på olika ”oväntade flöden” som kan komma att påverka inläckemätningar, samt hur effekterna av dessa flöden kan minskas.

För att erhålla bättre skattningar på exempelvis ”vattentransporter via ventilationssystem” och ”vattentransport via fordon” än de som redovisas i avsnittet 2.2, så bör det göras undersökningar i några olika typer av tunnlar, både under bygg- och driftskeden. Resultaten från dessa undersökningar skulle sedan kunna användas för att utforma några normvärden som skulle kunna användas vid mätosäkerhetsanalyser och vid redovisning av mätosäkerheter på uppmätta inläckage. Undersökningarna skulle kunna utföras av någon institution på någon högskola eller universitet.

En annan viktig faktor när det gäller mätosäkerheter på redovisade inläckageflöden är flödesmätarens noggrannhet vid de aktuella flödena. Den beror bl.a; av mätarens mätområde, samt hur mätaren sköts, involverande kalibreringar. Under avsnitten 3.2.3-3.2.5 redovisas olika mätartyper som använts i tunnlar med tillhörande noggrannheter.

Exempelvis skulle inläckagemätningar i en sektion kunna redovisas som en mätserie för en viss period eller medelvärden över period, med en tillhörande mätosäkerhet för den aktuella perioden. Dessutom biläggs vid dataleveransen en kortare redogörelse hur mätosäkerheten har beräknats.

Exempel:

Ett avsnitt i en tunnel har tilldelats ett maximalt tillåtet inläckage på 1 L/min per 100 m tunnel. Utgående från angivna värdesiffror så kan det innebära att flöden <1,5 L/min per 100 m tunnel är tillåtna.

Ett månadsmedelvärde under en period för det aktuella tunnelavsnittet, är lika högt som det maximalt tillåtna inläckagevärdet. De beräkningar som gjorts av mätosäkerheter visar att dessa kan variera mellan -0,2 till + 0,8 L/min per 100 m tunnel.

Redovisningen skulle då kunna se ut enligt följande:

Inläckage till tunnelavsnittet X-X under perioden Y-Y,

beräknat som månadsmedelvärde: 1 L/min per 100m tunnel ¹⁾

¹⁾ Beräknade mätosäkerheter för den aktuella perioden blev -0,2 till + 0,8 L/min per 100 m tunnel.

Beräkningar har baserats på följande:

- Ventilation: - 0,1 L/min (Normvärde, sommarförhållanden)
- Läckage under mätvall: + 0,1 L/min (Skattat värde i samband med läckagekontroll vid byggnation av mätvallen)
- Läckage i i sektionen från tillloppsledningar till tunneln: < -0,1 L/min (Skattat värde efter inspektion av ledningar)
- Etc.

Tolkningen av de redovisade värdena i exemplet ovan, är att utgående från beräknat medelvärde så kan inläckaget accepteras, men att det föreligger en viss risk att verkliga inläckaget kan ligga något högre än det uppsatta kravet.

2.4 Kapitel 2, sammanfattning

Krav har i miljödomar och arbetshandlingar uppställts för maximalt tillåtna inläckage till tunnelavsnitt, på så låga värden som 1 L/min per 100 m tunnel.

Mätmetoderna som använts i tunnelavsnitt med lågt satta maximala inflöden skiljer sig inte från avsnitt med högre tillåtna inflöden. Däremot har mätmetoder anpassats för de låga flödena.

Om alla effekter som kan påverka mätvärden vid lågt satta maximala inläckage skall beaktas, så kan mätinsatserna bli mycket omfattande och dyra.

Uppställda inläckagekrav har vanligen varit riktvärden men i framtida tunnlar kommer troligen begränsningsvärden att bli mer vanliga. Oavsett vilket av värdena som används så är överträdelser straffbara. Dock kan överträdelser mot riktvärden bedömas lindrigare i fall kraftåtgärder tas så att felet inte skall upprepas.

Om tvister uppstår, hur skall entreprenörer eller andra mätansvariga kunna bevisa att de uppmätta flödena inte överskrider det uppsatta kravet, utan att extrema mätinsatser utförs?

För att begränsa dessa omfattande mätinsatser så bör branschen komma fram till ett förfarande hur man skall hantera de olika typerna av "ovidkommande flöden" i tunnlar, som kan tänkas ge bidrag till mätosäkerheten i uppmätta inläckagevärden.

Nedan ges förslag arbetsförfaranden som kan användas för framtida diskussioner om mätningar i tunnelavsnitt med lågt satta maximala inflöden.

Redan i projekteringsfasen bör en mätosäkerhetsanalys göras som baseras på förväntade mätstrategier i projektet. I en mätosäkerhetsanalys kvantifieras samtliga felkällor och resultatet erhålls i form av ett värde på den totala mätosäkerheten. Om mätosäkerheten inte ligger på acceptabel nivå så kan gjord analys utnyttjas för att konstatera var förbättringsåtgärder effektivast skall sättas in, för att totalfelet skall minska.

I samband med redovisning av uppmätta inläckage under bygg-eller driftskeden så görs bedömningar av mätosäkerheter. Dessa görs inte för enskilda mätvärden utan för en mätperiod. Bedömningarna kan baseras på; mätningar, skattningar och framtagna normvärden för de faktorer som kan tänkas påverka den totala mätosäkerheten i de aktuella tunnelavsnitten.

Kravet på att sådana bedömningar måste göras borde också innebära att den organisation som är ansvarig för redovisade inläckagevärden, kontinuerligt ser över de faktorer som kan påverka den totala mätosäkerheten.

När mätvärden redovisas så görs en separat redovisning för skattad total mätosäkerhet för den aktuella perioden, samt skattningar över bidragen från de faktorer som påverkar den totala mätosäkerheten.

I avsnittet 2.2 har det tagits upp en del faktorer som kan påverka mätosäkerheten på mätta inflödesvärden. Dessa har omfattat:

- Vattentransporter via ventilationssystem.
- Vattenförbrukning under byggfasen (borrning, spolning mm).
- Vattentransport via fordon.
- Läckage i ledningar och ventiler.
- Vatten som kommer in via tunnelmynningar.
- Läckage i och under mätvallar.
- Temporära inläckage i uppborrade i injekteringsskärmar och bulthål.
- Magasinering

I avsnittet redovisas skattningar över storleksordningen på olika ”ovidkommande flöden” som kan komma att påverka inläckemätningar, samt hur effekterna av dessa flöden kan minskas.

Ventilationssystem. I en 1 km lång tunnel kan det sommartid under byggskedet komma in upp 0.5 L/min per 100 m tunnel. Motsvarande flöden som ventileras ur tunneln vintertid är kan vara upp till 3 gånger så höga, förutsatt att vatten finns tillgängligt för avdunstning. Andelen som kommer från inläckande vatten kan kanske motsvara ca 0.5 L/min per 100 m tunnel.

Under driftskedet kan ventilationen vara högre både under både sommar och vintertid, på grund av trafiken. Effekten på inläckagemätningarna blir troligen ändå inte högre då större delen av det kondenserade vattnet går till dagvattensystemet under sommaren. Under vintern så avdunstar troligen det mesta från vägbanan och bara en mindre del från tak och väggar.

För att i framtiden kunna tilldela mätosäkerheter på inläcksgevärden i tunnelavsnitt där maximala inläckagen är lågt satta, så skulle det behövas tas fram normvärden på vattenflöden orsakade av ventilation.

Vattentransport via fordon. Under byggskedet vintertid kan en del vatten i form av snö komma in i tunnlar via byggtrafiken. Detta vatten kan troligen ignoreras när det gäller inläckagemätningar. En del vatten transporteras ut ur tunnlar via utlastning av berg. Motsvarande gäller förhållanden sommartid.

Under driftskedet sommartid är vattentransporten in tunnlar begränsad. Däremot vintertid kan det föras in större mängder snö som ligger på biltak eller stänkskärmar. I en 1 km lång tunnel med en fordonstäthet på 30 000 fordon/dygn så har ”vatteninflödet” från dessa beräknas orsaka ett flöde på ca. 1 L/min per 100 m tunnel. Största andelen av detta vatten går till dagvattensystemet. Möjligen kan ca. 0.1 L/min och 100 m tunnel komma dräneringssystemet.

För att erhålla bättre skattningar på exempelvis ”vattentransporter via ventilationssystem” och ”vattentransport via fordon” än de som redovisas i avsnittet 2.2, så bör det göras grundliga undersökningar i några olika typer av tunnlar, både under bygg- och driftskeden. Värdena från dessa kan då användas som normvärden

Vattenförbrukning under byggskedet. Rätt stora vattenflöden används vid borring och urlastning av berg. Detta påverkar pumpflöden vid tunnelfront, men kan även påverka sektionsvisa mätningar uppströms tunnelfronten, då en del vatten följer med vid utlastning av berg och en delmängd av detta vatten kan rinna av lastbilsflaket under transporten.

Läckage i ledningar. Under byggskedet installeras flera olika typer av ledningar och slangar längs tunneln. För att säkerställa att dessa ledningar inte läcker så bör det finnas någon typ kontrollplan. Detta är speciellt viktigt i tunnelavsnitt där maximala inflöden är lågt satta.

Under driftskedet kan ledningsläckage ovan vägbanan komma till dräneringssystemet via sprickor i vägbeläggningen eller i anslutning till dagvattenbrunnar. Vatten från läckande dagvattenledningar och brunnar kan också komma till dräneringssystemet.

Vatten som kommer in via tunnelmynningen. Vid häftiga regn kan stora vattenflöden komma in via tunnelmynningen. Flöden på upp till ca. 100 l/min kan förekomma under några timmar. Mätvallar utrustade med någon typ av färst bör därför installeras vid mynningen. Under byggskedet kan antingen vattnet pumpas bort från mätvallen upp till ytan, eller mätas och ledas vidare ner till det dike som går längs tunnelväggen. Om kumulativa mätningar görs längs tunneln kan stora flödesvariationer innebära att de sektionsvisa bestämningarna av inflöden bli osäkra.

Under driftskedet kan vattnet ledas till dagvattensystemet och borde därmed inte påverka inläckagemätningarna.

Temporära inläckage i uppborrade injekteringskärmar och bulthål

Uppborrade injekteringskärmar eller bulthål kan under kortare perioder läcka in relativt stora mängder vatten. Är hålen borrade för förinjektering så kommer vattnet ut nära tunnelfronten. Är hålen borrade för efterinjektering så kan vattnet komma ut i någon sektion en bit från tunnelfronten. Man bör i samband mätningar göra noteringar om detta, så att avvikande mätvärden kan förklaras eller ignoreras.

Läckage i och under mätvallar. I avsnittet 2.2.6 och Bilaga B redovisas simuleringar av olika faktorer som kan påverka läckage under mätvallar. De parametrar som varierats är:

- Mätvallens tjocklek.
- Hydraulisk konduktivitet i bergmassa och störd zon (Störda zonen är orsakad av sprängning)
- Effekt av ridåinjektering
- Vattennivå i vattenmagasinet uppströms mätvall.
- Gradient in mot tunnel.

Det bör påpekas att resultaten från gjorda simuleringar är osäkra beroende på gjorda förenklingar och antaganden, som kan avvika från verkliga förhållanden.

För en mätvall med tjockleken 0.3 m så beräknades läckaget motsvara ca. 0.1 L/min per 100 m tunnel om vattennivån ovan vallen antogs vara 0,5 m och konduktiviteterna i berg och störd zon antogs vara 10^{-8} m/s respektive 10^{-6} m/s. Att utöka mätvallens tjocklek från 0,3 till 2 m får ingen större effekt på läckaget. I verkligheten kan dock en utökning av mätvallens tjocklek ge betydande effekt i de fall där en större kontaktyta mot berget stänger flödesvägar omedelbart under mätvallen. Ett mer effektivt sätt är att kontakinjektera och ridåinjektera mätvallen, se avsnittet ”effekt av ridåinjektering”.

Vid hög konduktivitet i störda zonen (10^{-5} m/s) och lägre konduktiviteter i berg (10^{-7} - 10^{-8} m/s) så erhöles läckage motsvarande 1,2-1,3 L/min per 100 m tunnel. Om konduktiviteten i störda zonen minskades till 10^{-6} m/s och berget antogs ha en konduktivitet 10^{-8} m/s så minskade även läckaget med ca. en 10-potens. Läckagets storlek och flödesmönstret under mätvallen ändras givetvis med konduktiviteten i den störda zonen, men påverkas även starkt av konduktiviteten i övriga berget. En liten skillnad mellan konduktivitet i störda zonen och i berget minimerar läckaget. Det innebär att om berget är tätt så är det en fördel om störda zonen kan minimeras i anslutning till mätvallen.

De simuleringar som gjordes med ridåinjektering till ett djup av ca 1.5 m under mätvallen visade att läckaget då blev försumbart (<0,01 L/min per 100 m tunnel). Även simuleringar utan ridåinjektering visar att läckaget under mätvallen ligger inom det marginaler som kan tänkas accepteras vid normalt ansatta maximala inläckagevärden.

Ett ökat magasinsdjup ger ett ökat hydrostatisk tryck under magasinet och med det en ökad infiltration. När konduktiviteten i störda zonen ansattes till 10^{-5} m/s och konduktiviteten i berg till 10^{-8} m/s så erhöles ett läckage motsvarande 0.6 L/min per 100 m tunnel. Motsvarande värde med ett magasinsdjup på 0,1 m blev 0.3 L/min per 100 m tunnel. Effekten av en större utbredning av vattenmagasinet uppströms en mätvall på grund av ökat magasinsdjup har ingen påverkan på flödesmönstret under mätvallen och därmed ej heller på läckagets storlek. Om mätvallar anläggs på platser med stor sidolutning minimeras uppdämningen längs vallen och därmed även läckaget. Men även på andra platser bör stävan vara att hålla nere dämmningshöjden.

Om man önskar att minimera kostnader vid utformning av mätvallar relativt de mätosäkerheter som kan orsakas av läckage under mätvallen, så kan kanske mätvallar delas in i två ”typer”. Den ena typen (typ A) kan användas för att mäta flöden i tunnelavsnitt där det maximala tillåtna inflödet till tunnelavsnittet är satt under ca. 2 L/min per 100 m tunnel. Den andra typen (typ B) kan användas för avsnitt av tunnlar där det maximalt tillåtna inflödet är högre.

Ofta finns det angivna lägen för mätvallar eller avstånd mellan mätvallar i de handlingar som tas fram under projekteringsfasen. Vid senare mer detaljerade planering av lägen för mätvallar är det viktigt att utnyttja eventuella förundersökningar (sprickfrekvens, hydraulisk konduktivitet och formationstryck) som kan finns tillgängliga vid uppdateringar av lägen för mätvallar. Nedan ges ett förslag på krav som kan ställas på vallar av typ A.

Mätvallar av typ A bör/skall:

- Utformas för att enbart mäta flöden från det aktuella tunnelavsnittet. Inläckande vatten uppströms tunnelavsnittet leds längs tunneln via en sluten ledning.
- Ha väl rengjord tunnelbotten på det läge i tunneln där mätvallen skall installeras
- Kontakt- och ridåinjekteras
- Anläggs i ett tunnelavsnitt där skonsam sprängning använts (max sprängskadezon 0,3 m). Det skall vara möjligt att flytta mätvallen +/- 5m i tunnelns längsled, för att undvika eventuell sprickzon i berget. Det kan innebära att skonsam sprängning måste utföras på en sträcka på ca 10 m.
- Ha låg dämmningshöjd
- Kontrolleras med avseende på läckage. Detta kan göras genom att berget rensas nerströms mätvallen motsvarande en längd på utströmningsområdet för utläckage. Vatten fylls uppströms vallen till dämmningsgränsen, varefter eventuella läckage skattas nerströms dammen.

Kraven på mätvallar av typ B kan vara något lägre, se avsnittet 2.2.6., diskussioner.

En annan viktig faktor när det gäller mätosäkerheter på redovisade inläckageflöden är flödesmätarens noggrannhet vid de aktuella flödena. Den beror bl.a.; av mätarens mätområde, samt hur mätaren sköts, involverande kalibreringar. Under avsnitten 3.2.3-3.2.5 redovisas olika mätartyper som använts i tunnlar, med tillhörande noggrannheter.

3 Sammanställning befintliga installationer och mätutrustningar

Tunnlar i berg byggs för olika ändamål, med olika typer av konstruktioner och brytningsteknik.

Under byggtiden så används mätningar av inläckande vatten till att styra upp tätningåtgärder samt för att kontrollera om inläckagen ligger under de gränser som uppställts i miljödomar och arbetshandlingar.

Under drifttiden så används mätvärdena i huvudsak för att kontrollera om läckagen ligger under uppsatta gränsvärden.

Både när det gäller bygg- och drifttid så kan gränsvärden vara uppställda för hela tunnllängden eller för både sektioner längs tunnel och hela tunneln.

När mätningar av flöden görs både sektionsvis och för hela tunneln, så förväntas de summerade sektionsvisa mätningarna stämma överens med totalflödet.

I Vägverkets publikation Tunnel 2004 och Banverkets publikation BV Tunnel (BVS 585.40) samt Bygg-AMA finns riktlinjer redovisade om bl.a.:

- dag-, avlopps- dräneringssystem
- schaktbottens lutning och diken vid tunnelväggar
- injektering och sprutbetong
- beklädnad och dräner

Se även avsnittet 2.1.

Alla tunnlar som byggs idag görs ej helt i enlighet med vad som står publikationerna. Det är ändå en information som kan användas när befintliga mätanordningar för inläckage av vatten skall utvärderas och nya skall konstrueras.

Med mätanordning menas här både anordningen för att samla upp vatten och själva mätaren.

Vanligen så är mätanordningarna under byggtiden inte samma som under drifttiden, men för att hålla nere kostnaderna finns det önskemål att de kan vara samma.

3.1 Befintliga mätsystem utomlands

För att fånga upp den tekniska nivån och ambitionen vad gäller mätningar av inläckande vatten i tunnlar så har information samlats in från några länder. Konsultföretag, myndigheter och entreprenadföretag har kontaktats för att få en bild av hur denna fråga hanteras. Undersökningen gör inga anspråk på att vara en fullständig redovisning av situationen i respektive land. Ambitionen är att ge en generell bild av hur frågan hanteras. Trots många kontakter via e-post och telefon är det konkreta utfallet något lägre än vad som är önskvärt. Detta förhindrar dock inte att en relativt tydlig, om än inte

detaljerad, uppfattning erhållits av hur mätning av inläckande vatten till tunnlar hanteras.

Den generella bilden är att mätningar av inläckande vatten till tunnlar inte mäts med standardiserade metoder. Krav på maximalt inläckage per längd tunnel, totalt eller för vissa delsträckor finns ofta ställda men mätningarnas mätosäkerhet är inte i fokus och inget statligt eller liknande organ har metodbeskrivningar eller motsvarande. Bilden när det gäller mätningar överensstämmande i stort med den vi ser i Sverige i dag, exempelvis när det gäller mätningar av totalflöden från pumpar, sedimentationsbassänger och mätvallar. Ofta kommer hårdare krav, rutiner och mer medveten kontroll av inflöden som en konsekvens av uppkomna problem som miljöpåverkan på markytan orsakad av avsänkta grundvattenytor, sättningar med åtföljande skadeståndskrav eller att inläckande vatten försvårar tunneldrivningen i byggskedet.

De länder som ingår i sammanställningen är länder med relativt stort antal bergtunnlar och med förhållanden som kan liknas vid de svenska.

3.1.1 Australien

Australiens befolkning är i allmänhet koncentrerad till kusterna och östkusten i synnerhet. De tunnelbyggen som är intressanta är belägna i storstadsregionerna i öst. Som exempel kan nämnas att västra delstaten Western Australia med en areal av mer än 5,5 gånger Sveriges yta har endast en vägtunnel. Intrycket är att mätningar av inläckage i tunnlar hanteras på liknande sätt som andra undersökta länder. Frågan har dock aktualiserats i samband med stora projekt där inläckage med påföljande grundvattensänkning har varit ett problem (se exempel nedan).

Från ett konsultföretag gavs ett exempel på metoder som har använts för mätning av inläckage i något eller några projekt:

- installera mätvallar uppströms och nedströms den intressanta sträckan
- pumpa eller överleda på annat sätt vattnet som kommer uppströms den sträcka som skall mätas
- installera ett v-format överfall vid mätvallen längs ned på det avsnitt som skall mätas
- mäta nivåhöjningen över tid i en grop, samt nivån vid mätöverfallet, för att skatta flöden

Kommentarer som gjordes av installationen där man poängterar viktiga punkter för kontroll av mätningarna tyder på att metoden har brukats i tunnelavsnitt där det ställts krav på låga inflöden. Noggrannhet vid installation och genomförande av mätningar kan antas utifrån den beskrivning av förfarandet som givits.

CityLink och EastLink

I CityLink projektet i Melbourne ingår två tunnlar 1,6 respektive 3,6 km långa. Burnley tunneln, som är den längre tunneln, har dragits med stora problem, orsakade av höga

vattentryck och stora inflöden. Burnleytunneln går under parker, Yarra River och tätbefolkade förorter på ett djup upp till ca 60 m. Tunneln var designad som en dränerad tunnel men på grund av stora inflöden under tunneldrivningen tvingades man att ompröva tunneldesignen och delar av tunneln byggdes helt täta. Detta gav senare problem med bottenuppträckning och vidare åtgärder krävdes för att komma tillrätta med detta. Ett system för återinfiltration av grundvatten byggdes för att motverka grundvsttensänkningar, men även andra åtgärder har gjorts för att minska inläckaget. Det fanns inga uppställda krav på flödesmätningar under vare sig bygg- eller driftfas för tunnarna i Citylink projektet. Flödesmätningar gjordes för pumpat vatten från tillfälligt installerade system och i driftskedet från det permanenta systemet av dräner.

Erfarenheterna från CityLink projektet ledde till omfattande krav redan i upphandlingsfasen för det s.k. EastLink projektet. Kraven i kontraktet var:

(f) Groundwater Seepage

(i) Appropriate treatments must be employed during construction to minimise groundwater seepage. Permanent treatments must be employed as required to ensure that any water present on internal surfaces does not affect the safety and function of the tunnels.

(ii) Each Concessionaire must ensure that any groundwater seepage into the completed tunnels and associated works is not viable and that there are no water drops. Notwithstanding these requirements, water ingress must be limited to the following:

(A) gross seepage rate must not exceed 1 litre per second for the combined inflow from groundwater into both the internal and external drainage systems of the tunnels;

(B) average seepage rate through the tunnel structures over any 240 metre length must not exceed 0.1 litre per second;

(C) groundwater seepage through the pavement and floors must be nil (0 litres per second); and

(D) groundwater seepage to or from Mullum Mullum Creek must be such that no change in the existing flow regimes occurs as a result of the carrying out of the Construction Activities or the Operation Activities.

(iii) The Concessionaire must ensure that there are no effects of groundwater chemistry on the overall tunnel structure integrity or the tunnel drainage system, including the potential for precipitation to reduce the effectiveness of the drainage system, over the Design Life of the tunnels.

Två parallella tunnelrör ca 1,6 km långa skulle drivas under Mullum Mullum Valley, ett område med stora naturvärden. Vid byggandet av tunneln visade det sig att inläckaget var mycket lågt, till viss del tack vare att bygget genomfördes under en torrperiod. Från den med visuella inspektionen kunde konstateras att inflöden till tunneln låg långt under uppställda gränsvärden, varför inga flödesmätningar gjordes.

3.1.2 Norge

Mätningar av inläckage till tunnlar görs i väg- och tågtunnlar, vanligen manuellt med klocka och hink vid mätvall. Liksom i Sverige så beaktas vanligen inte alla felkällor (Vattenflöden via ventilationssystem, nederbörd via tunnelmynning o.s.v.) vid mätningar av låga flöden.

Ulven-Sinsen

Ett aktuellt exempel där mätningar av inläckage till tunnlar görs med manuella mätningar vid mätvallar, är vägprojektet Ulven-Sinsen i Oslo. Kraven på maximalt inläckage varierar för de olika delsträckorna. De för projektet strängaste satta kraven på inläckage är 3,5 L/min per 100 m. Mätanordningarna utgörs av mätvall med ingjutet rör

som möjliggöra mätning med klocka och hink. Kontrollen utförs i detta projekt av byggherren.

Romeriksporten

Ett undantag från de manuella mätningarna utgör det mätsystem som installerats i Jernbaneverkets tågtunnel Romeriksporten.

Romeriksporten är en 14,6 km lång tunnel som löper mellan Etterstad i Oslo och Lilleström. Tunnelprojektet har dragits med stora problem med kraftiga inläckage som resulterat i sättningsproblematik och avvattning av våtmarker och sjöar. Under första halvåret 1997 stod det klart att inläckaget till Romeriksporten ledde till sänkning av vattennivåerna i sjöarna Lutvann, Søndre och Nordre Puttjern samt i närliggande våtmarker i området Östmarka. I stadsdelar i närheten av tunnelsträckningen förekom svåra sättningskador på grund av minskat portryck. Akuta åtgärder i form av infiltrationsbrunnar sattes in för att komma till rätta med sättningsproblematiken i den påverkade stadsdelen. Idag finns ett permanent infiltrations- och övervakningssystem i sättningsdrabbade området. Infiltrationsbrunnar borrade från tunneln i vilka dränvatten från tunneln pumpas tillbaks ut i berget installerades 1999. Det gjordes för att stoppa skadeförloppet i Östmarka genom att skapa ett mottryck i berget för att hindra eller minska grundvattensänkningen under torrperioder.

Uppkomna skador resulterade i ett omfattande mätprogram som under åren reviderats, anpassats och till stora delar automatiserats. Idag mäts inläckage till tunneln, vattentryck och flöde för respektive infiltrationsbrunn, grundvattenstånd, portryck, klimatdata, vattenstånd och vattenföring i Søndre och Nordre Puttjern, samt ett stort antal punkter för sättningsmätningar. Data samlas i en accessdatabas för, kontroll, presentation, analys och rapportering.

Från tunneln finns data på vattenföring från och med 1999 då dräneringssystemet i tunneln färdigställdes. Dräneringssystemet är anpassat för uppsamling av inläckande vatten och tunneln har utrustats med täta barriärer och mätrännor samt nedstigningsbrunnar möjliggör åtkomst av mätutrustningen.

Fem mätrännor är idag installerade i tunneln och utrustade för automatisk övervakning och överföring av data via fiber till Jernbaneverket. Dessa är av typen H-ränna med en övre mätgräns på 53,5 L/s. För nivåregistrering i mätrännorna används en ISCO Bubbler flowmeter type 4230 med analog signalutgång. Vid mätrännan som mäter totalflödet ur tunneln, registreras vattennivån med hjälp av ytterligare en tryckgivare. De båda givarna är kopplade till separata loggrar för att minska risken för databortfall.

Det är i huvudsak mätningar från mätrännorna som används för avrapportering, men dessa kompletteras och kontrolleras med manuella mätningar med hink och klocka samt utspädningsmätningar med saltlösning.

För manuella kontrollmätningar har ett mätprogram med rutiner och detaljerade beskrivningar för underhåll, utförande och avrapportering har tagits fram för att säkerställa att mätningarna utförs på ett korrekt sätt. En utvärdering av mätmetoder samt felskattningar för dessa föregick implementerandet av mät- och insamlingssystem. Detta har resulterat i att övervakning, uppföljning och styrning av åtgärder har kunnat skötas på ett effektivt sätt. Sammanställningen ovan har gjorts utgående från den information

som erhållits av Steinar Myrabø i det norska Jernbaneverket. (Myrabø, S. 2002, Myrabø, S. 2005 och Myrabø, S. 2008).

3.1.3 Österrike

Generellt sett så är flödesmätningar inte någon central fråga. Inga speciella krav eller standardiserade förfaranden finns.

Tunnlar i urbana regioner i Österrike består till allra största delen av tunnlar för tunnelbana i Wien. Dessa tunnlar är designade med vattentät lining dvs. inget inläckage kan tolereras vare sig under tunneldrivning eller i driftfas. Eventuella inläckage måste åtgärdas, varför efterföljande flödesmätningar i dessa tunnlar inte ansetts aktuella.

Vid andra tunnelprojekt mäts normalt under byggsleden utgående vatten från tunneln. Mätningar görs med hjälp av de pumpar som levererar vattnet till sedimentationsanläggningen eller med flödesmätare på utgående vatten från sedimentationsanläggningen. För speciella behov kan mätningar göras vid nedstigningsbrunnar (oftast belägna så tätt som var 50:e meter enligt uppgift).

3.1.4 Schweiz

År 2015 beräknas Schweiz ha ca 300 kilometer vägtunnel. I Schweiz finns ett flertal långa väg- och tågtunnlar. Den kanske mest omtalade tunneln i Schweiz är Sankt Gotthardstunneln som utgör en del av europavägen E35 och motorvägen A2 med järnvägstunnel parallellt med vägtunneln. Det största pågående projektet är Gotthardbastunneln, en 57 km lång järnvägstunnel som skall avlasta den befintliga tunneln som utgör en flaskhals för kommunikation och transport. Många av tunnelarna ligger dock inte inom urbana områden och mätning av inläckage har inte varit någon större fråga. Enligt uppgift är det vanligare att fokus ligger på att övervaka grundvatten, portryck och sättningar istället för inläckage, dvs. övervakning av eventuella konsekvenser.

Gotthard-bastunneln

I det pågående projektet med Gotthard-bastunneln mäts kumulativt flöde var 300 m med anledning av risk för sättningar i närbelägna valvdammar.

Engelbergtunneln

Den tidigare dragningen av järnväg mellan Grafenort och Engelberg hade en största lutning på 245‰. En 1600 m lång sträcka med s.k. kuggbana var kraftigt begränsande för sträckans kapacitet. Den kritiska sträckan ersattes med en 4040 m lång enkeltub för ökad kapacitet samt lägre skötsel- och underhållskostnader. Geologin innehöll karstområden och problem uppstod då inläckagen till tunneln blev mycket stora. Tre mätstationer för automatisk övervakning av inläckage installerades. Flödesmätning utförs vid två punkter. Totalflödet mäts vid tunnelmynningen samt en mätstation för kontroll av den stora inflödespunkten (ca 700 L/s) knappt två kilometer in i tunneln.

Uppmätta flöden är mycket stora (ca 1000 L/s totalt) och mätningarna utförs som en följd av detta med rektangulära överfall utan sidokontraktion, dvs. överfallets bredd är densamma som kanalen. Kanalens längd och utformning är viktig för att teoretiska samband för nivå och flöde skall gälla och utformningen på de aktuella installationerna är tillfredsställande. Nivån vid överfallet vid tunnelmynningen övervakas med hjälp av

tryckgivare och nivån vid mätstationen inne i tunneln övervakas av ultraljudsgivare. Båda metoder är vedertagna och valet kan styras av praktiska förhållanden på platsen samt miljön med avseende på fukt, korrosionsrisk, störningar på vattenytan o.s.v.

För Engelbergstunneln var sättningsproblematik inte aktuell, då det saknas skadeobjekt i påverkansområdet.



Figur 3-1. Rektangulärt överfall installerat vid Engelbergstunnelns norra tunnelmynning.

3.1.5 USA

Office of Infrastructure utgör en del av Federal Highway Administration (FHWA), och som utgör en del av Department of Transportation (DOT) och är ansvariga för standarder, involverande metoder och guidelines inom en rad områden relaterade till infrastruktur. Deras uttalade uppdrag är att "Provide for the Nation's mobility needs by improving highway infrastructure". Vid kontakt med Office of Infrastructure uppger de att det inte finns någon standard eller rekommendationer för utformning av mätanordningar för flödesmätningar i tunnlar. National Highway Institute (NHI) utgör en del av FHWA och har som mål att utbilda, informera samt att sprida kunskap. NHI har tagit fram ett dokument, Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels - Civil Elements, FHWA-NHI-09-010, som innehåller vissa rekommendationer för tillåtna inläckage i olika typer av tunnlar. I avsnitten om kontroll av grundvatten hanteras inte kontroll av mängden inläckande vatten till tunneln, utan fokus ligger på uppföljning av omgivningspåverkan.

Ett stort antal kontakter har tagits i USA och det samlade intrycket är att frågan hanteras som i övriga länder, dvs. krav kan finnas på utföraren vad gäller maximalt inläckage vid färdigställandet, men metoder för kontroller mot uppställda krav är inte specificerade.

Central Link Light Rail, Beacon Hill Project, Seattle

Central Link Light Rail är en spårbunden transport genom centrala Seattle. Tunneln under Beacon Hill, en stadsdel i sydöstra Seattle, är byggd med TBM och linad med tätade betongelement. Det fanns ej krav på att mäta inflöden till tunneln under byggnadstiden, men krav fanns för driftskedet vilka kontrolleras vid färdigställandet av tunneln. Byggherren specificerade inte hur kontroll av inflödet skulle genomföras, dvs. det var upp till entreprenören att besluta om mätmetoden.

Uppställda krav i kontraktet var:

3.08 WATER LEAKAGE

- A. Remedial measures shall be undertaken to reduce inflow at the Contractor's cost and with Sound Transit's approval if water leakage after lining is completed exceeds:
 1. 0.1 gallon per linear foot of tunnel per 24 hours measured over any 1000 feet of tunnel; or
 2. 0.6 gallon per linear foot of tunnel per 24 hours measured over any 30-foot length of tunnel, remedial measures shall be undertaken to reduce flow.
- B. No flowing water or drips above tunnel walkway level will be permitted.

Kraven är baserade på tunnelns innerdiameter som i det här fallet är 18 feet 10 inches.

Problem erhöles i samband med tunneldrivningen igenom vattenbärande sandiga jordar. Dessa utgjorde ca 90 m av tunnelns totalt ca 1300 m. Övriga delar gick genom leror och morän. Vid färdigställandet av tunneln konstaterades att den relativt tät, men det fanns ett antal punkter som krävde åtgärder i form av kompletterande injektering och liknande.

Vidtagna åtgärder hade god effekt och efter åtgärdsprogrammet kunde en okulärbesiktning av dräneringssystemet klargöra att inläckaget låg väl inom de uppsatta kraven. Med andra ord så genomfördes i detta projekt inga mätningar.

3.1.6 Övriga internationella exempel

Uppgifter från några andra länder indikerar också att den dominerande mätmetoden är skarpkantade V-formade överfall. Exempelvis vid ett tunnelprojekt i Taiwan för höghastighetståg så installerades temporärt överfall för att möjliggöra mätning av inflöde vid tunnelns front i samband med att en sprickzon passerades, se Figur 3-2.



Figur 3-2. Flödesmätning med hjälp av V-format överfall vid tunnelbrytning för höghastighetståg i Taiwan.

3.2 Befintliga mätsystem i Sverige

3.2.1 Övergripande mätstrategier som använts i tunnlår

Mätningar av enbart totala inflöden under byggsleden.

Beroende på lutningsförhållanden längs tunneln så rinner allt vatten till tunnelns lågpunkt eller till någon pumpgrop längs tunneln. I det fall vattnet pumpas från flera tunnelfronter eller flera pumpgropar till en gemensam sedimentationsdamm på ytan så har flödet ofta mätts på utloppsledningen från dammen. För att konstatera hur stor andel av flödet som utgörs av inläckande vatten, så har även mätningar gjorts på processvatten eller så har endast mätningar gjorts då det är ingen aktivitet i tunneln.

Mätningar av totala inflöden samt flöden till tunnelavsnitt under byggsleden

För att göra sektionsvisa mätningar så byggs i anslutning till sektionsgränserna någon typ av anordning för att samla i vattnet. Den mest vanliga anordningen är en damm på vilken eller till vilken olika mätutrustningar kan anslutas. Vattnet som kommer från utloppet på mätarna kan forslas vidare enligt följande;

- Pumpas bort från en pumpgrop i nära anslutning till mätanordningen
- Ledas vidare via självfall till nästa mätanordning nedströms (kumulativ mätning)
- Ledas vidare via självfall till en gemensam slutna ledning för dräneringsvatten.

Vatten kan också samlas i en pumpgrop utan att en mätvall anläggs. Flöden till dessa beräknas utgående från urpumpade volymer eller uppmätta flöden under pumpningen.

Vattnet som kommer in till tunneln via vattenledningar mäts med någon typ av mätare ansluten till ledningen.

Mätningar av totala inflöden under driftsleden

I tunnlår som har separata dagvatten- och dräneringssystem så beräknas inläckaget vanligen från det utpumpade vattnet från tunnelns pumpstation. Vanligen ingår inte mätningar av inkommandevatten (exempelvis vatten till brandposter mm) i mätsystemet för tunneln utan den erhålls från vattendistributören.

Mätningar av totala inflöden samt flöden till tunnelavsnitt under driftsleden

Sektionsvisa mätningar under driftsleden har förekommit i enstaka fall både i väg- och järnvägstunnlar.

Vid sektionsvisa mätningar så byggs i anslutning till sektionsgränser någon typ av mätvall för att samla upp vattnet, till vilken olika mätutrustningar kan anslutas. Vattnet som kommer från utloppet på mätarna kan forslas vidare via självfall till nästa mätanordning nedströms tunneln (kumulativ mätning), eller till en gemensam slutna ledning för dräneringsvatten.

Det vatten som kommer till tunnlårnas lågpunkter eller någon separat pumpgrop pumpas upp till markytan och mäts med någon typ av flödesmätare.

Vattnet som kommer in till tunneln via vattenledningar mäts med någon typ av mätare ansluten till ledningen. Denna mätning ingår vanligtvis inte i ordinarie mätsystemet för tunnlar.

3.2.2 Uppsamlingsanordningar

Stuff

I det fall tunneln drivs neråt så samlas det inläckande vattnet och vattnet från brytningen vid stuff . Från stuff pumpas vattnet upp till ytan med exempelvis en mobil pumpstation, se avsnittet 3.2.8. Pumpstationer.

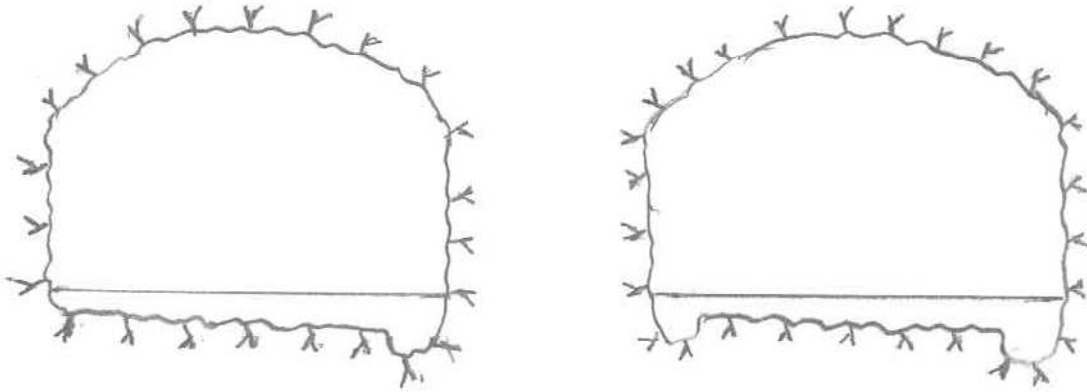
Diken

Enligt Vägverkets och Banverkets riktlinjer för sprängda tunnlar så skall tunnelbotten tvärs tunneln luta minst 5% mot den ena sidan på tunnelväggen. På denna sida skall det finnas ett dike som skall ha ett djup så att nedre delen av en dräneringslang ligger minst 1 m under vägbanan. Tunnelbottnarna i vägtunnlar kan ibland luta upp till nästan 15 % i sidled, varvid dikesformen blir mer diffus, se figur 3.2 nedan. I fullortsborrade tunnlar görs ett dike i (rektangelformat) i botten på tunneln.

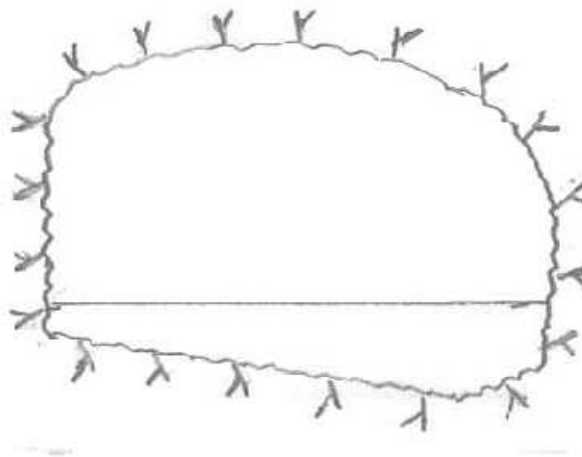
Om arbetstunnlar undantas så är den största rekommenderade lutningen (längs tunneln) i vägtunnlar 5 % . För järnväg så strävar man efter att hålla banan så nära horisontell som möjligt. Normalt så får lutningen inte överskrida 10‰ på rullande kilometer med en största lokal lutning som inte får överskrida 12‰. I speciella fall där trafikförutsättningarna så medger kan större lutningar accepteras efter särskilda utredningar.

Vanligen så bryts diken ut samtidigt som tunneln bryts ut. Det är dock inte helt ovanligt att delsträckor av dikena fylls igen med stenkross för att erhålla en bredare vägbana under byggtiden. Om detta sker så försvårar det inledande flödesmätningar längs diket

Under byggskedet samlas både vatten slam och i ovan nämnda diken. I det fall kravet varit att flöden skall skattas från avsnitt av en tunnel, så har anpassningar gjorts i diket på de aktuella mätplatsernas.



Figur 3-3. Tvärsnitt över tunnlar med lutande tunnelbotten och utsprängda diken. T.v. tunnel med torra förhållanden, t.h. tunnel med mycket våta förhållanden.



Figur 3-4. Tvärsnitt över tunnel med en lutande tunnelbotten utan utpräglat dike

Pumpgropar

Pumpgropar anläggs vanligen på platser där;

- det är svårt för vattnet att rinna vidare nedströms tunneln
- vatten inte skall rinna vidare
- enkla flödesmätningar skall göras på det tillrinnande vatten

Pumpgropar anläggs ofta utgående från de idéer som de ansvariga har på den aktuella platsen. Därför har det byggts många typer av pumpgropar och dimensionerna har varierat mycket. Diametern längst upp på gropen överskrider vanligen 2-3 m och djupen kan variera från några decimeter till 1.5 m.

Exempel på gropar:

- Lågpunkter i bergbotten där vatten samlas.
- Utsprängda mindre gropar*.
- Uppdämning av det dike som går längs väggen på den lägsta sidan av tunnelbotten. Mätvallen tvärs diket har bestått av betong alternativt finkorniga fyllnadsmassor.

*I några järnvägstunnlar har under byggtiden anlagts en variant av sprängda gropar. Vid utsprängning av tunneln så ökas stickvinkeln på laddningshålerna på den plats där gropen skall anläggas, så att djupet kan bli upp till ca 1,5 m djup under bergbotten. Gropen kläs med betong. I gropen staplas 2-3 st cementringar, som vanligen har en diameter på 1200 mm. Cementringarna är perforerade så att vatten kan rinna in till insidan ringen, där en pump sitter monterad. Grövre material sedimenterar på utsidan ringen och finare i botten på ringen. Vid rensning så slamsugs de två utrymmena.

Mätvallar

I rapport används ordet mätvall för dammar som byggs tvärs över tunneln och som används för att samla upp vatten från ett avsnitt av en tunnel. Mätvallarna är vanligen gjorda av betong och byggs vinkelrätt eller nästan vinkelrätt mot tunnelns riktning. Från mätvallen går någon typ av ledning på vilken en mätare kan anslutas eller som kan utnyttjas för manuella mätningar exempelvis med hink och klocka. Avstånd mellan mätvallar kan variera, men är vanligen inte mindre än 100 m.

En del mätvallar anläggs enbart i det dike som går längs ena tunnelväggen.

Mätvallar skall:

- ha en höjd motsvarande den maximala dämningens gräns för mätanordningen, men får inte vara högre än vad byggnormerna tillåter under driftfasen. Under byggfasen kan den förses med någon typ av överbyggnad så att fordon kan passera
- vara täta, gäller även kontakten mot bergytan.
- tåla den mekaniska påverkan som kan tänkas uppstå under mättiden

Höjden mellan bergyta och överkant mätvall varierar mellan olika anläggningar. Tillfälliga dammar kan ha höjder ner mot 0.3 m. Eftersom tunnelbotten i allmänhet lutar mycket mot den ena sidan så kan sådana låga mätvallar betraktas som styrningar för vattenflödet. Den del av vallen som ligger över dämningens gräns skulle kunna ersättas med ett dike som fylls med ett dränerande lager av krossmaterial.

Permanent dammar i exempelvis tunnelbanetunnlar kan ha höjder upp mot 0.8-0.9 m. Den verkliga dämmningshöjden är dock lägre om exempelvis en dräneringsslang placeras längs mätvallen något under dammkrönet

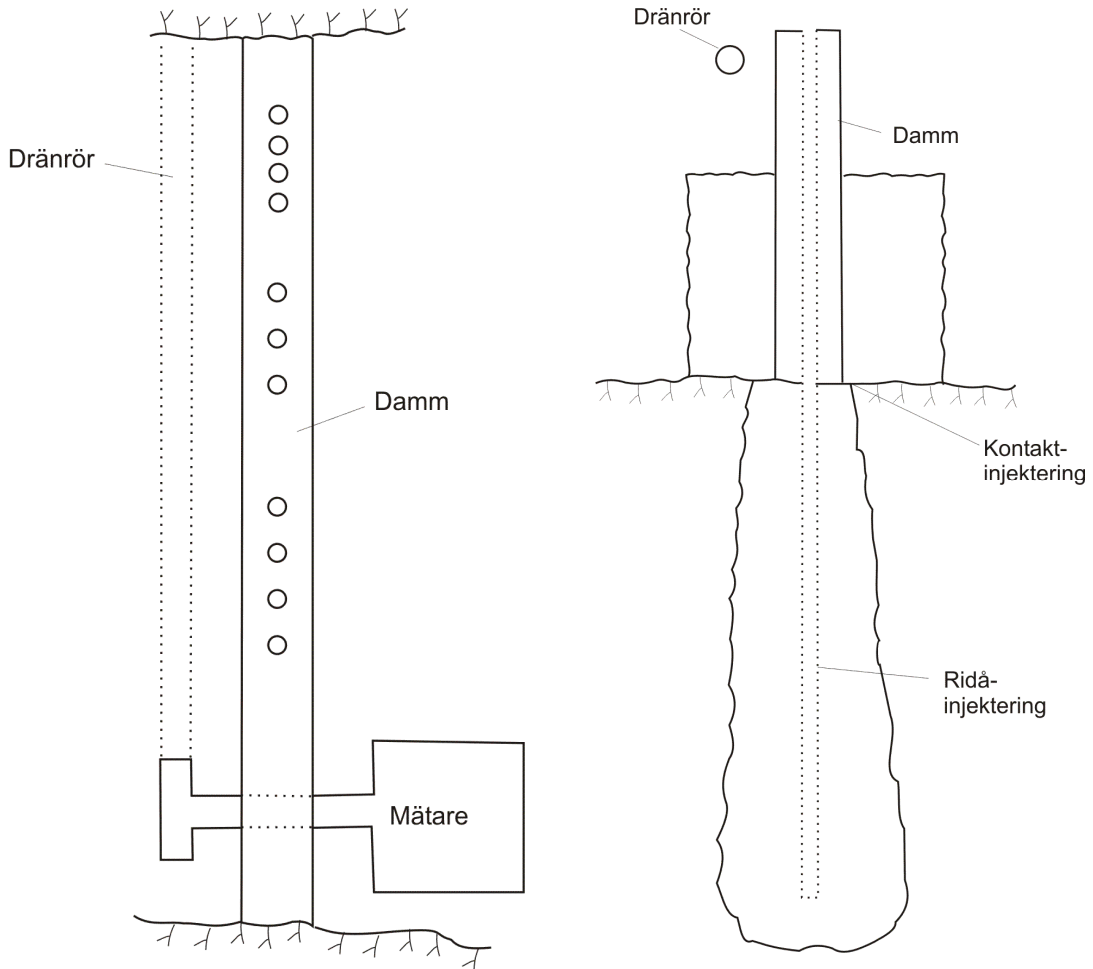
Vanligen görs för permanenta mätvallar kontaktinjektering mellan bergytan och underkant mätvall, alternativt installeras fogband gjorda av exempelvis butylgummi och bentonit. Bandet expanderar i kontakt med vatten. Det har även gjorts enstaka tester med bentonitlera, för att föra att avtåta dammar mm i anslutning av tunnlar. Bentonitleran kan exempelvis appliceras på bergbotten nära mätvallen, så att den även täcker nedre delen på vallen.

Vanligen brukar även ridåinjektering göras under mätvallen till ett djupa av ca 1.5-2 m, se figurerna 3-5 och 3-6.

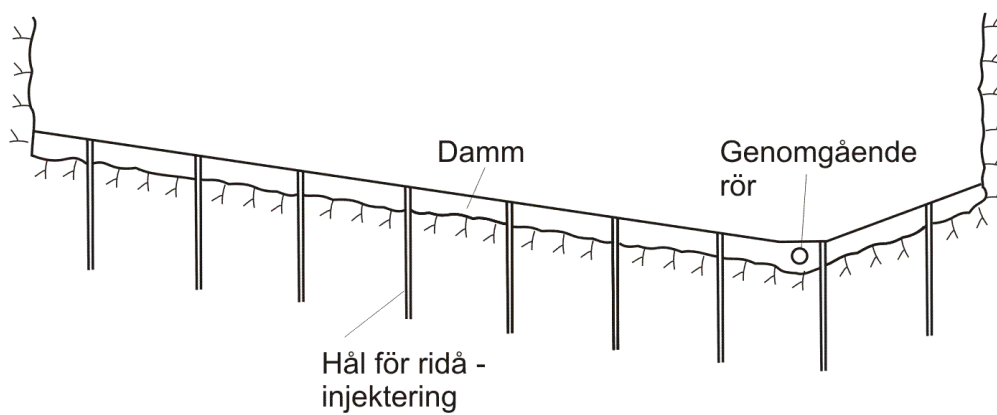
Det är en fördel om mätvallens dämmningshöjd kan minimeras, sett till läckagerisker i och under mätvallen. Låga dämmningshöjder kan dock vara till nackdel för vissa mätartyper.

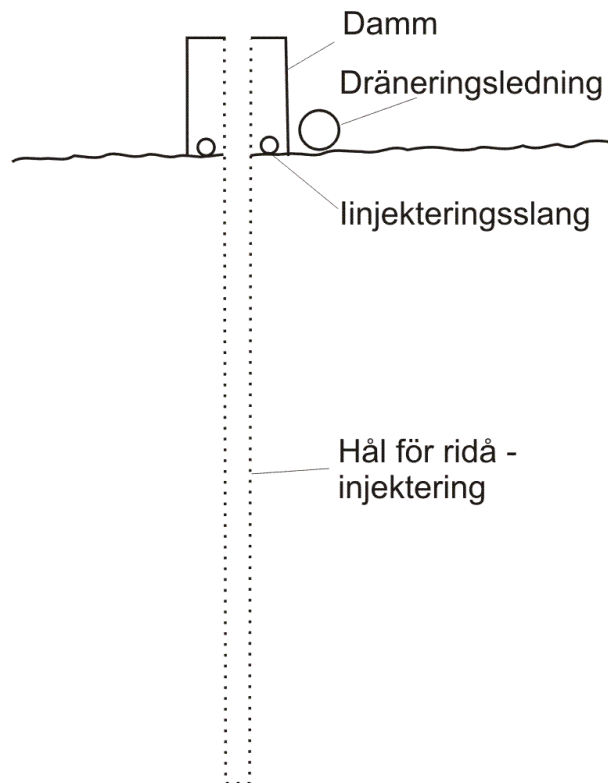
Nedan redovisas några olika exempel på mätvallar från:

- Tunnelbanetunnel under driftskede, figur 3-5.
- Väggtunnel under byggskede, figur 3-6.
- Järnvägstunnel under driftskede, figur 3-7.

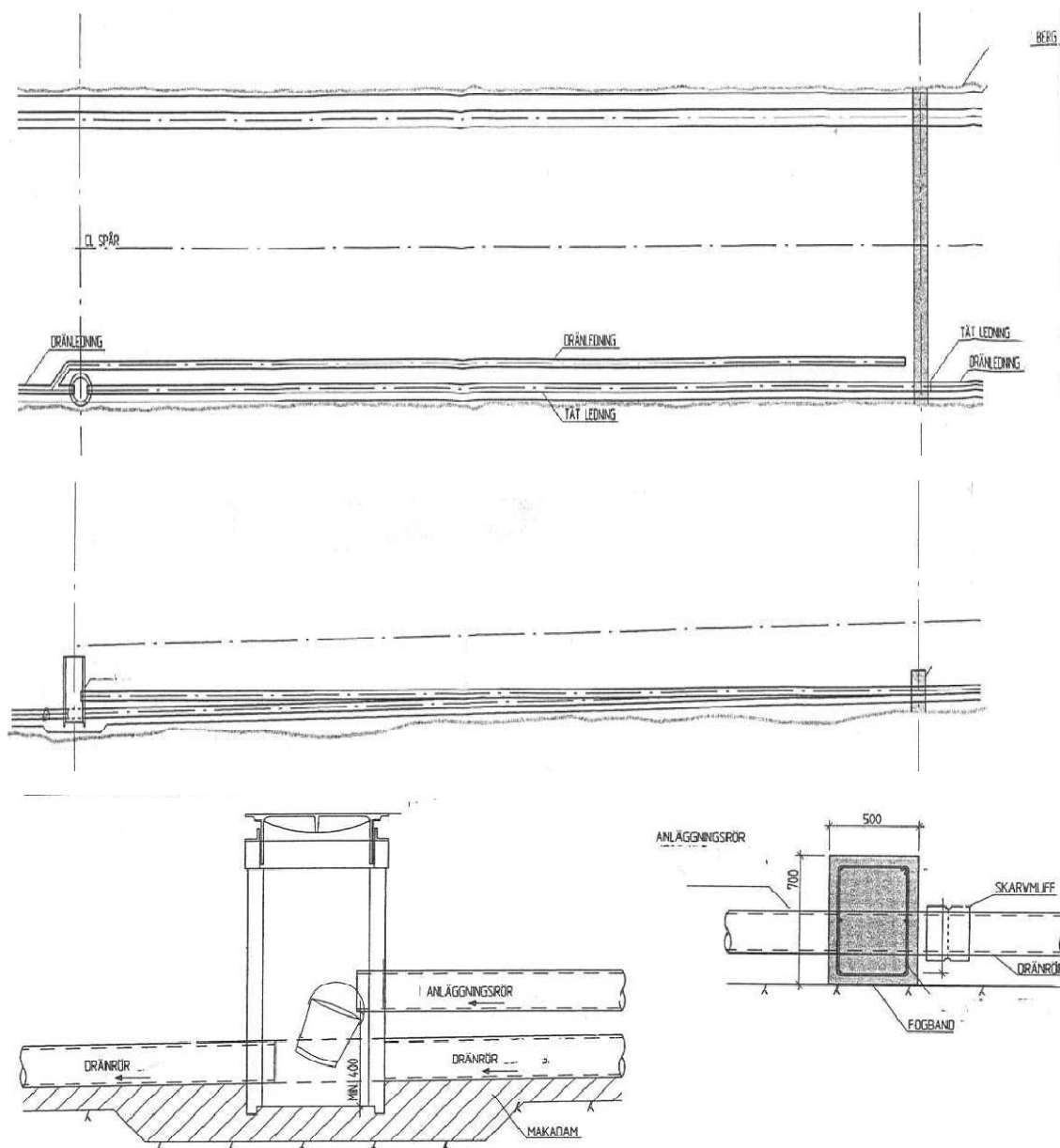


Figur 3-5. Hög permanent installerad mätvall i en tunnelbanetunnel. T.v sett ovanifrån. T.h. sett från sidan.





Figur 3-6. Låg mätvall installerad under byggfasen i en vägtunnel. Mätvallen är ridå- och kontaktinjekterad och har genomgående rör. Öre skiss, sett framifrån. Nedre skiss sett från sidan.



Figur 3-7. Mätvall installerad för mätningar under driftskedet i en järnvägstunnel. Konstruktionen är gjord för kumulativa mätningar från sektioner längs tunneln. Övre skiss, planritning med rör, mätvall och brunn. I mitten profilritning. Nedre skisser, detaljer över brunn och mätvall

Dräner och inklädnader

Dräner och olika typer av inklädnader används för att erhålla ett torrt och isfritt utrymme i tunnlar. Exempel på funktionskrav hämtade från Löttingetunneln:

- Fukt, dropp eller rinnande vatten får inte förekomma från anfang till anfang.
- Rinnande vatten får inte förekomma från tunnelvägg. Inläckage skall minimeras så att dropp på tunnelvägg undviks.

- För att kontrollera avrinning från dräner till avvattningsystemet fungerar, skall vattennivå i dräner på vägg kunna kontrolleras sektionvis, med maximalt 100 m intervall.

En del av konstruktionerna för inklädnader är framtagna för att leda bort inläckande vatten i tak och väggar till dräneringssystemet, medan andra skall försluta tunnelväggen så att inget vatten läcker in. Dräner och inklädnader förses vanligen med isoleringsmaterial om det finns risk för frysning.

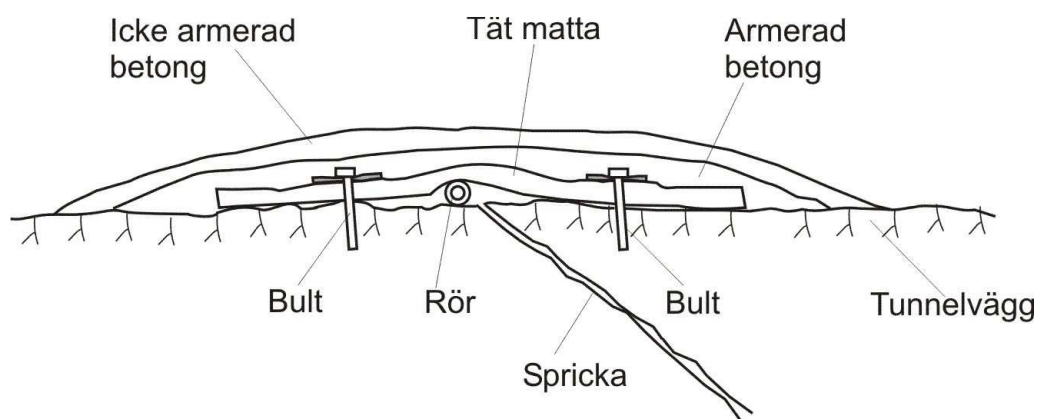
Exempel på inklädnader och dräner:

- Betonglining i form av gjutning med tillhörande armering direkt mot tunnelvägg. Görs där kravet är att erhålla ett skydd, som även skall kunna motstå höga hydrostatiska tryck.
- Betonglining som gjuts mot Platonmatta som placerats mot tunnelvägg. Mattan är ansluten till en dräneringsslang som går längs botten på tunneln i det aktuella tunnelavsnittet. Avsektionering av tunneln görs med gjutningar direkt mot tunnelvägg. När gjutningarna mot Platonmattan är klar så stängs dräneringsledningen, varefter vattentrycket får byggas upp. Konstruktionen har använts i Hallandsåstunneln.
- Lining som består av prefabricerade betongblock som installeras på plats med exempelvis en maskin för fullortsborring. Insidan block kan vara monterad ca 30 cm från tunnelvägg och utrymmet fylls vanligen med pärlsingel. För att undvika vattentransport längs tunneln på utsidan lining, så gjuts avtätningar vars avstånd styrs av storleken på inläckagen. I Hallandsåstunneln har det förekommit avstånd upp till 100 m. Konstruktionen skall tåla höga hydrostatiska tryck, exempelvis för Hallandsåstunneln var kraven satta till 150 mvp.
- Sprutbetong direkt på tunnelvägg. Armering kan utgöras av nät eller fibrer, inblandade i betongen. Denna inklädnad är i allmänhet inte helt tät. Vatten som kommer ut i borrhålsväggen sprids ut i betongen så att större fuktade ytor kan erhållas.
- Inklädnader med prefabricerade betongelement för både tak och väggar, vilka ibland installeras mot ett gummimembran för att öka tätheten. Utrymmet mellan bergvägg och betongelementen är vanligen inte inspekterbart.
- Membran eller plåtinklädnader som fästs med bultar i tak och väggar. Utrymmet mellan berg och membran är vanligen inspekterbart.
- Membran som sprutas med betong.
- Dräner som monteras över punktläckage eller större ytor med många små diffusa inläckage, utfördes tidigare med mineralullsmattor som täcktes med duk eller nät. Från mattan gick ett rör som avledde vattnet till dräneringsmaterialet under vägbanan.

I figur 3-8. nedan finns en schematisk skiss över en insprutad drän. I anslutning av sprickan monteras ett rör för avledning av vatten. Röret täcks med en tät värmeisolerande matta eller en duk som förankras i berget med korta bultar.

Mattan sprutas med armerad betong. För att undvika problem med utstickande vassa fibrer så sprutas ytterligare ett lager med oarmerad betong. Dräner installeras ibland även efter det att tunnlar tagits i drift.

- I gruvor och i servicetunnlar till järnvägstunnlar har ibland monterats enklare öppna uppsamlingsanordningar för punktläckage. De fästs mot vägg eller tak och som ansluts till ett stuprör.



Figur 3-8. Schematisk skiss över en insprutad drän.

Det tunnlar som byggts i Sverige har ofta innehållit kombinationer av ovan uppräknade inklädnader och dräner.

Det som är av intresse för mätning av inläckage till en tunnel eller till tunnelavsnitt är var det inläckade vattnet leds.

Exempel om:

- enbart taket är försett med inklädnad så rinner vattnet på inklädnanden till tunnelvägg. I järnvägstunnlar där fuktkravet i trafikutrymmet är inte så högt ställt så kan vattnet tillåtas sippra på ytan på tunnelväggen. I trafiktunnlar anordnas en typ av hängrännor vid takfoten. På vissa avstånd längs rännan anläggs stuprör ner över tunnelvägg, dessa isoleras och sprutas på ungefär samma sätt som en drän, se figur 3-6. Vid enstaka stora punktinflöden ovan inklädnaden så formas inklädnaden så att vattnet kan styras ner i ett stuprör, alternativt så anläggs en drän. Vattnet från stuprören leds ner i fyllnadsmaterialet och via detta till dräneringsledningarna. Vid eventuella krav på att inläckage skall mätas sektionsvis även under driftskeden så måste stuprören från tak ledas till rätt sida på sektionsbegränsningen.
- både tak och väggar eller enbart väggar är inklädda så får vattnet rinna i mellanrummet mellan berg och inklädnad ner till dräneringslagret. Vid eventuella sektionsvisa mätningar under driftskeden kan det ibland tänkas att en del av det inkommande vattnet rinner till ”fel sida” på mätvallen. Detta är dock troligen undantagsfall.

- dräner som installerats försetts med avloppsrör så leds dessa till dräneringslagret och vidare till dräneringsledningarna.
- inläckande vatten diffunderar ut på beklädnadsytan, exempelvis sprutbetong eller stenullsmattor på dräner, så kan vatten avgå via ventilationen. Det är dock ofta små volymer, se avsnittet 2.2.
- vatten läcker ut från beklädnadssystemet eller dräner och hamnar på vägbanan så kommer detta till dagvattensystemet och blir därmed inte med i beräkningarna för inläckage. Det är i allmänhet små volymer.
- det i linade tunnlar är långt mellan avtätningarna eller om de sektionssvisa avtätningarna är dåligt installerade eller placerade över väggavsnitt med sprickor, så kan vatten rinna längs tunneln mellan berg och lining. Det kan då innebära påverkan av de hydrogeologiska förhållandena i området längs tunneln.

Rör från dräner samt området där röret mynnar i fyllnadsmassor kan med tiden sättas igen med utfällningar, alger mm. Detta kan få till följd att inläckande vatten från tak och väggar kan ibland komma till dagvattensystemet i stället för till dräneringssystemet. Detta är troligen inte vanligt och om det sker så borde dessa volymer vara små jämfört med det totala inläckaget. För undanröja dessa problem så skrivs det vanligen in i drift- och skötselplaner hur ofta dräner skall kontrolleras och spolas.

Separata flödesmätningar i rör från dräner eller inklädnader har bara gjorts i forskningssyfte för att exempelvis få kunskap om hur flöden från en punktkälla varierar med tiden. Vid små inflöden har vattnet vanligen bara samlats upp i kärl under en viss tid.

Dräneringssystem

Inför driftskedet monteras dräneringslangar längs diket vid tunnelvägg. Inläckande vatten skall transporteras i fyllnadsmaterialet fram till dräneringsledningen. I trafik-tunnlar så installeras samlingsbrunnar på ett avstånd på ca 150 m. Samlingsbrunnarna innehåller sandfällor och kan också användas som spolbrunnar vid rensning av dräneringsledningar. Samlingsbrunnarna är vanligen förbundna med varandra både med en dräneringsslang och en sluten ledning.

I motsvarande installationer i järnvägstunnlar så finns det i allmänhet bara en dräneringsledning mellan samlingsbrunnarna. Dessa brunnar är vanligen placerade med ett avstånd på ca 80-100 m.

I tunnlar som byggts i forskningssyfte och där kravet varit sektionssvisa mätningar så har dräneringsvattnets flöde mätts vid sektionssgränserna, varefter det letts till en sluten stamledning som går till en pumpgröp vid tunnelns slut.

3.2.3 Mätare som använts eller testats i tunnlar

Flödesmätare för tunnlar används både för att mäta inkommande vatten via vattenledningar (processvatten för exempelvis för borring), samt för att mäta och

beräkna inläckande vatten till tunneln. I sammanställningen nedan har medtagits mätare som anses fungera då vattnet innehåller partiklar. Massflödesmätare har utelämnats på grund av de anses dyra. De noggrannheter som anges för de olika mätarna är de som anges av leverantörerna. Mätosäkerheterna kan dock vara mycket större beroende på hur mätarna installerats, hur de sköts i form av rengöring och kalibreringar, samt hur mätvärden omräknas till flöden.

Det är viktigt att sensorer och mätenheter är anpassade till den miljö (fukt och smuts) som de skall vara installerad i, och att enheterna ändå skyddas för oförutsedda händelser. Exempelvis skall loggrar och förstärkarenheter vara installerade på en sådan nivå att aldrig vattnet kan nå dit

Om det krävs kontinuerliga mätningar så är det ur noggrannhetssynpunkt önskvärt att de dimensioneras utgående från de förväntade maximala flödena på den aktuella platsen. Ibland används mätarna för att mäta snabba tömningar av en pumpgrop, och då måste mätarens mätområde kanske vara 10 gånger högre än det maximala flödet till gropan.

Valet av flödesmätare görs vanligen utgående från förväntade maximala flöden och den friktionsförlust (dämningseffekt) som erhålls av mätaren. Om mätaren är monterad på ett rör och drivkällan är en pump så är friktionsförlusten vanligen av underordnad betydelse. Däremot om drivkraften är fallhöjden från en mätvall kan den vara av betydelse.

I tabell 3-1 ges ett exempel på noggrannheter och friktionsförluster för elektromagnetiska flödesmätare med olika mätområden, där det aktuella maximala flödet antas vara 45 l/min

Tabell 3-1. Friktionsförluster och noggrannheter för elektromagnetiska flödesmätare.

Mätartyp	DN 10	DN 15	DN 25	DN 40	DN 65	DN 100
Maxflöde (L/min)	45	100	200	600	2000	4670
Medelhastighet vid 45 L/min (m/s)	9.5	4.3	1.5	0.6	0.2	0.01
Teoretiskt fel vid 45L/min (L/min)	+/- 0.23	+/- 0.23	+/- 0.23	+/- 0.23	+/- 0.7	+/- 1.6
Tryckfall igenom mätaren(m.v.p)	0.57	0.08	0.01	<0.01	<0.01	<0.01

För att minimera risken för igensättningar i rör och mätare brukar man rekommendera att flödes hastigheterna bör vara över 1.5 -3 m/sekund, beroende bl.a. på andelen slam

och slammets sammansättning. När det gäller rör i tunnlar så brukar hastigheterna under längre tider vara under ovan nämnda värden, då rören är dimensionerade för de extrema flöden som kan tänkas uppstå exempelvis då en större zon passeras.

För de nedan nämnda mätarna finns angivna noggrannheter. Dessa omfattar inte fel i mätta vattenflöden orsakade av att vattnet kan innehålla olika mängder med slam. Slamhalten påverkar både vätskans viskositet och vatteninnehåll. Några av mätarna grundas på någon typ av mätningar av volymer och den verkliga vattenvolymen påverkas av slaminnehållet. Andra grundas på uppmätta friktionsförluster över någon typ av strypning och då kan både viskositet och vatteninnehåll ha påverkan. De utgående från mätarna avlästa flödet blir något större än det verkliga vattenflödet. Ju färre sedimentationssteg vattnet genomgår, desto högre slamhalt.



Figur 3-9. Slamblandat vatten efter tre sedimentationssteg i NL 34 Norra Länken

Vid borring och avspolning bergytor vid utlastning kan slamhalterna bli höga på det vatten som samlas på bergbotten vid tunnelstuff. Vanligen så pumpas detta vatten upp i någon sedimentationsanordning innan de mäts och pumpas vidare till högre nivåer. Om det finns två sedimentationsbehållare vid pumpanordningen vid tunnelfront så torde slaminnehållet aldrig överstiga 0.5-1 volymprocent.

Mätningar av vatten som kommer till pumpgropar

I avsnittet ”Pumpgropar” under 3.2.2 beskrivs några olika typer av gropar. I groparna monteras en pump som pumpar vattnet till ytan eller till en ovanliggande nivå i tunneln.

Flöden till pumpgropar skattas vanligen enligt följande:

- Uppmätning av gångtider på pumpar samt utnyttjande av pumpars kapacitetskurvor.
- Uppmätning av fyllnadstiden för en pumpgrop med känd volym. Pumparna styrs av nivåvakter. När gropen är full startas pumpen och när den är tom stoppas den. Beräkning av flöden baseras på hur ofta pumpar startas.
- Mätta pumpflöden med någon typ av flödesmätare.

Mätosäkerheten i flödesberäkningarna ovan beror av många faktorer exempelvis;

- Noggrannheten i volymsbestämningen av pumpgropen.
- Pumpars kapacitetsförändringar med tiden orsakade exempelvis av slitage
- Noggrannhet i tidsbestämningar pumpars gångtider.
- Noggrannhet på vald flödesmätare för de aktuella flödesintervallen
- Valda skannings- och lagringsintervall för flödesmätningarna, se avsnittet 3.2.8.
- Hur bra pumpens backventil fungerar, när pumpen stoppas.

3.2.4 Mätningar i öppna ledningar

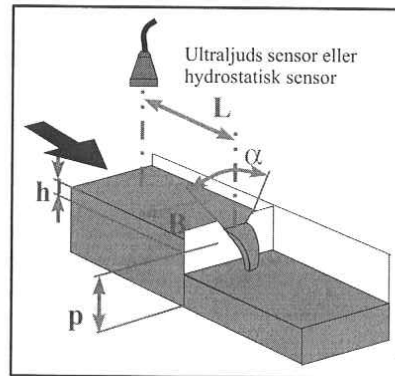
Vid mätningar i olika typer av ledningar bör man beakta att mätanordningarna kan frysa nära tunnelmynningarna om icke motåtgärder görs för detta. Detta gäller även mätningar i öppna ledningar.

Mätöverfall

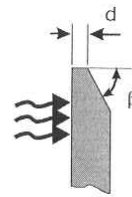
Mätöverfall är den mest förekommande mätanordningen i tunnlar och har använts under många år. De är monterade antingen direkt på en mätvall eller på en mätlåda i anslutning till mätvallen. Vattnet flödar ut igenom ett sk. skibord. Flödet beror av nivån uppströms skibordet. Vinkeln på skiborden varierar vanligen 5-45 grader. Vid mätningar av extremt låga flöden har ibland rektangulära öppningar använts, med en spaltbredd ner till 2 mm. Även om det finns färdiga flödestabeller för olika skibord, så brukar de kalibreras innan och efter installation.

De är inte helt nödvändigt att mätöverfall byggs i enligt måttnormerna för exempelvis Thomsonöverfall, se figur 3-10. nedan. Det förutsätter dock att skiborden kalibreras efter installationen och att kalibreringskurvan innehåller många mätpunkter.

Uppgifter överensstämmer med ISO 1438 samt Naturvårdsverkets allmänna råd 90.2



- β = minst 45°
 d = 1 - 2 mm
 p = Djup före kant i m
 h = uppdämningshöjd (nivå)
 B = Kanalens bredd i m
 L = Avstånd till sensor,
 3 till 4 x h max före mätöverfallet.



Följande begränsningar ska gälla:

- α = mellan 20° och 100°
 h_{\max}/p = max 0,4
 $h_{\max}B$ = max 0,2
 h = min 0,06 m
 p = min 0,45 m

Figur 3-10. Rekommenderade mått för mätöverfall (V-formade), enligt ISO 1438.

Flöden beräknas utgående från nivån i mätlådan och en avbördningsekvation för det aktuella skibordet. Mätning av nivåer görs vanligen; manuellt med mätsticka (ibland fastsatt på lådan), eller med ultraljudsgivare alternativt tryckgivare. Trycket mäts vanligen relativt lufttrycket i tunneln.

Leverantörsuppgifter angående upplösning och noggrannheter på använda nivågivare

Mätare	Noggrannhet % av full skala	Noggrannhet mm	Upplösning mm
Mätsticka		Ca. +/- 2*	Ca. +/- 1
Ultraljudsgivare	Ca. +/- 0.025	Ca. +/- 1.5	Ca. +/- 1
Tryckgivare		Ca +/-0.5	Ca. +/-0.1

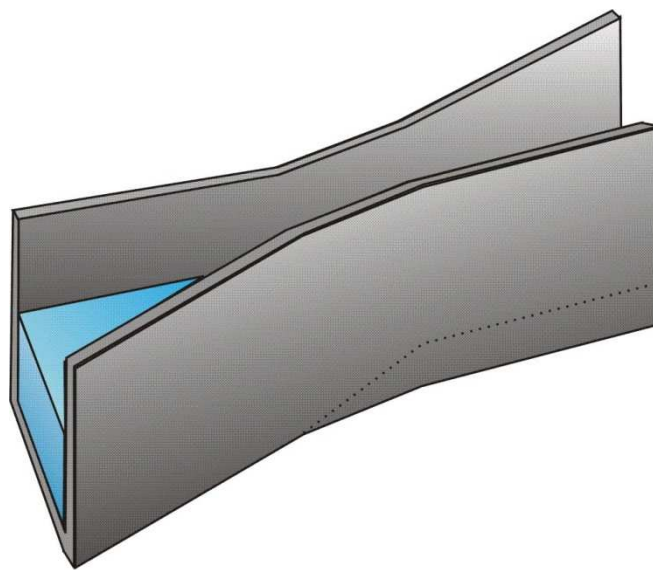
* Noggrannheten bättre om mikrometer används

Mätrännor för öppna system.

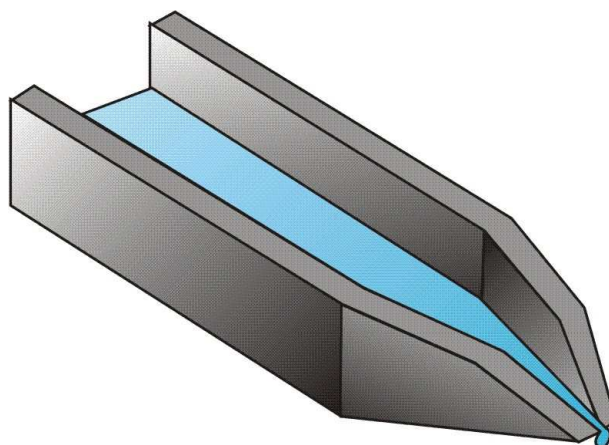
Det finns olika typer av standardiserade mätrännor, som baseras på någon typ förträngning och som kan monteras i diken. Exempelvis; Parshall mätrännor, Palmer-

Bowlus mätrännor och mätrännor av ”typ H”, se figurerna 3-11 och 3-12. De standardiserade utformningarna möjliggör beräkningar av flöden förutsatt att nivåskillnaden över förträngningen är känd. Vanligtvis görs ändå kalibreringar av de tillverkade rännorna. Mätrännor kan köpas färdiga eller tillverkas enligt enlig standardritningar, för många olika flödesområden. Leverantörer av mätrännor redovisar ofta mycket stora mätområden för enskilda rännor. Vid registrering av mätvärden så mäts vattennivåer före och efter förträngning vanligen med en tryckgivare eller en ultraljudsgivare, se avsnittet mätöverfall.

Mätrännor är ofta enkla att mekaniskt rensa och är delvis självrensande då det erhålls en hastighetshöjning på vattnet vid förträngningen



Figur 3-11. Parshallrännan



Figur 3-12. Ränna av typ H

Dopplermätare för öppna rör eller diken

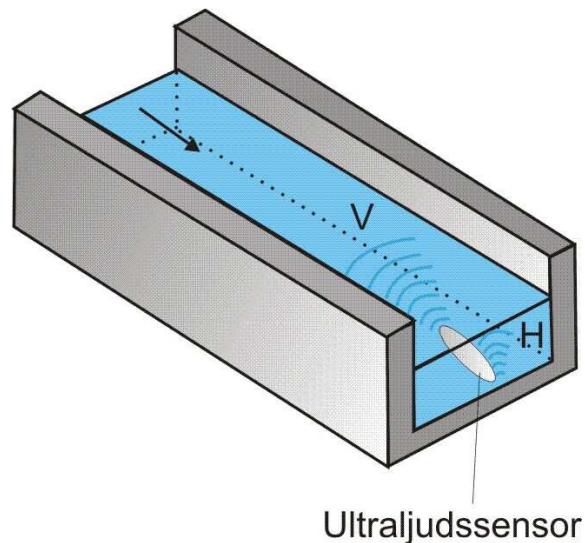
Dopplermätare används i bl.a. för att mäta flöden i avloppsledningar men har även testats i diken i tunnlar med relativt höga flöden. Vanligen placeras mätarens sensor på rännans eller dikets botten. En schematisk skiss över en mätinstallation kan ses i figur 3-13.

Det finns två varianter av mätare. En som mäter flödet i en riktning och en som mäter flöden i två riktningar. Mätprincipen grundar sig på att ultraljud sänds ut från en sensor i en eller två riktningar. Partiklar eller luftbubblor i vattnet reflekterar ultraljudsvågorna. Partiklarnas rörelse förändrar frekvensen på de returnerade ljudvågorna. Detta förhållande kan användas för att bestämma hastigheten i en del av tvärsnittsarean. Vanligen innehåller sensorn ytterligare en givare som används för att bestämma vattennivån i rännan eller diket. Ibland monteras denna sensor ovan vattenytan. Vattenhastigheten i en del av tvärsnittsarean tillsammans med vattennivån kan användas för att beräkna flödet i diket eller rännan, förutsatt att flödesförhållandena i den aktuella tunnelgeometrin är känd.

Mätområde och noggrannhet förekommande dopplermätare

Mätområde m/s	Noggrannhet på aktuellt värde (%)
Ca. 0.03-6	Ca. +/- 2 till +/- 5

Nivåmätare som används i kombination med dopplermätare kan vanligen ej registrera nivåer under ca 25 mm, om givaren är monterad under vattenytan. Noggrannheten i nivåmätningen är ca +/- 0.25 % på aktuellt värde.



Figur 3-13. Ränna med ultraljudsmätare för både nivå- och hastighet

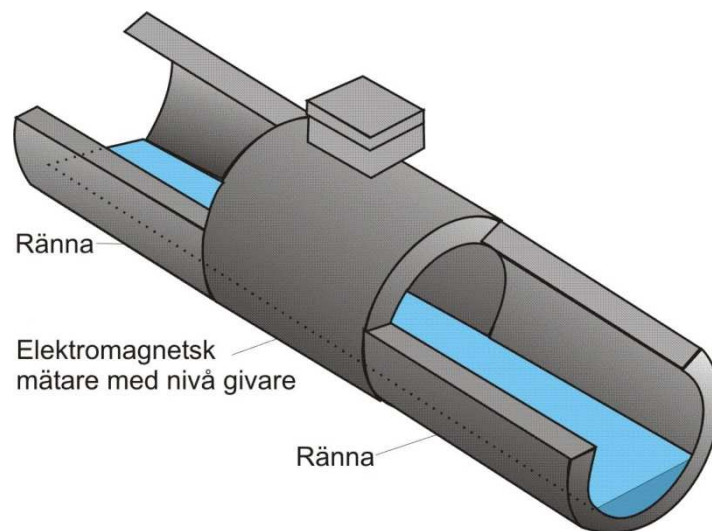
Elektromagnetiska flödesmätare för icke fyllda rör

Det finns elektromagnetiska flödesmätare som är konstruerade för att mäta flöden även i icke vattenfyllda rör, se figur 3-14. Mätprincipen för elektromagnetiska mätare, se avsnittet nedan om "Elektromagnetiska flödesmätare anslutna till rör". I det fall mätningar önskas utföras i en öppen ränna eller dike så borde det vara möjligt att montera kortare rännor på vardera sidan av mätaren. Rännorna avtätas mot dikesbotten. I mätaren finns det även en sensor för mätning av vattennivå. Flödet beräknas utgående från uppmätta vattenhastigheter, nivåer samt aktuell tvärsnittsarea. Det finns inga erfarenheter i Sverige på ovan nämnda förslag på montage.

Mätområde och noggrannhet för elektromagnetisk flödesmätare för icke fyllda rör

Flödesområde	Noggrannhet
m/s	% på fullt mätområde
1-12	+/-1*

*Gäller icke fyllda rör ner till en fyllnadsgrad på 10 mm för mätare DN 200



Figur 3-14. Elektromagnetisk mätare med nivågivare för mätning i icke helt vattenfyllda rör eller rännor

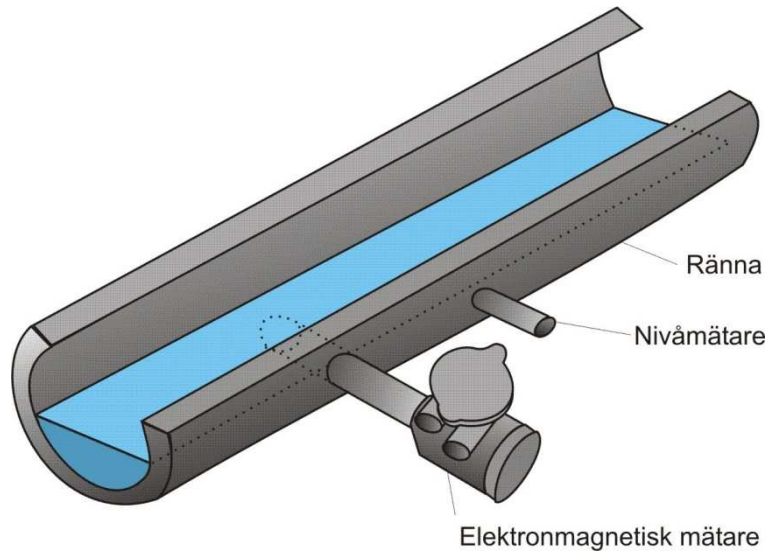
Det finns även en elektromagnetisk sensor som kan stickas igenom en stös på ett vattenledningsrör, se figur 3-15. Sensorn har en diameter på ca 30 mm och är tänkt att användas i helt vattenfyllda rör. Den svenske leverantören trodde att sensorn kunde även fungera i icke fyllda rör förutsatt att hela sensorn var nedsänkt i vattnet, men hade inte hört talas om att någon testat detta. För att kunna beräkna flöden måste sensorn kompletteras med en nivågivare.

Mätområde och noggrannhet för elektromagnetisk flödesmätare (insticksgivare)

Mätområde (m/s)	Noggrannhet av aktuellt mätvärde (%) Fyllt rör
1-9	5*

*För hastigheter under 1 m/s är noggrannheten +/- 3cm /s

Då sensorn sitter i vätskan kommer det troligen att bli avlagringar på den med tiden, så att den måste tas ut och rengöras med jämna mellanrum.



Figur 3-15. Elektromagnetisk mätare i form av instickssensor.

3.2.5 Mätningar i slutna ledningar

Vinghjulsätare

Vinghjulsätare är en mätartyp som använts under många år i tunnlar, främst för att beräkna det processvatten som kommer ner till tunneln. Mätaren var ursprungligen enbart en volymätare, som grundas på att det flödande vattnet roterar skovlar. Rotationen överförs via en axel till ett räkneverk. Önskade man att erhålla ett flöde fick man beräkna skillnaden mellan två volymsberäkningar och dividera värdet med tidsskillnaden. Vanligen hade mätarna mycket större mätområden än vad som var nödvändigt, vilket fick till följd att upplösningen på den registrerade volymen blev för liten och därmed kunde framräknade medelflöden innehålla relativt stora fel. Det var heller inte vanligt att skötselinstruktioner följdes och att mätarna kalibrerades. Denna mätartyp skall inte användas för vatten som innehåller slam.

Nyare typer av vinghjulsätare kan förses med elektronik så att det även blir möjligt att registrera flöden. När det gäller flöden brukar leverantörerna ange en noggrannhet på ca. +/- 2% av aktuellt värde i området maxflöde - 1/10 av maxflödet.

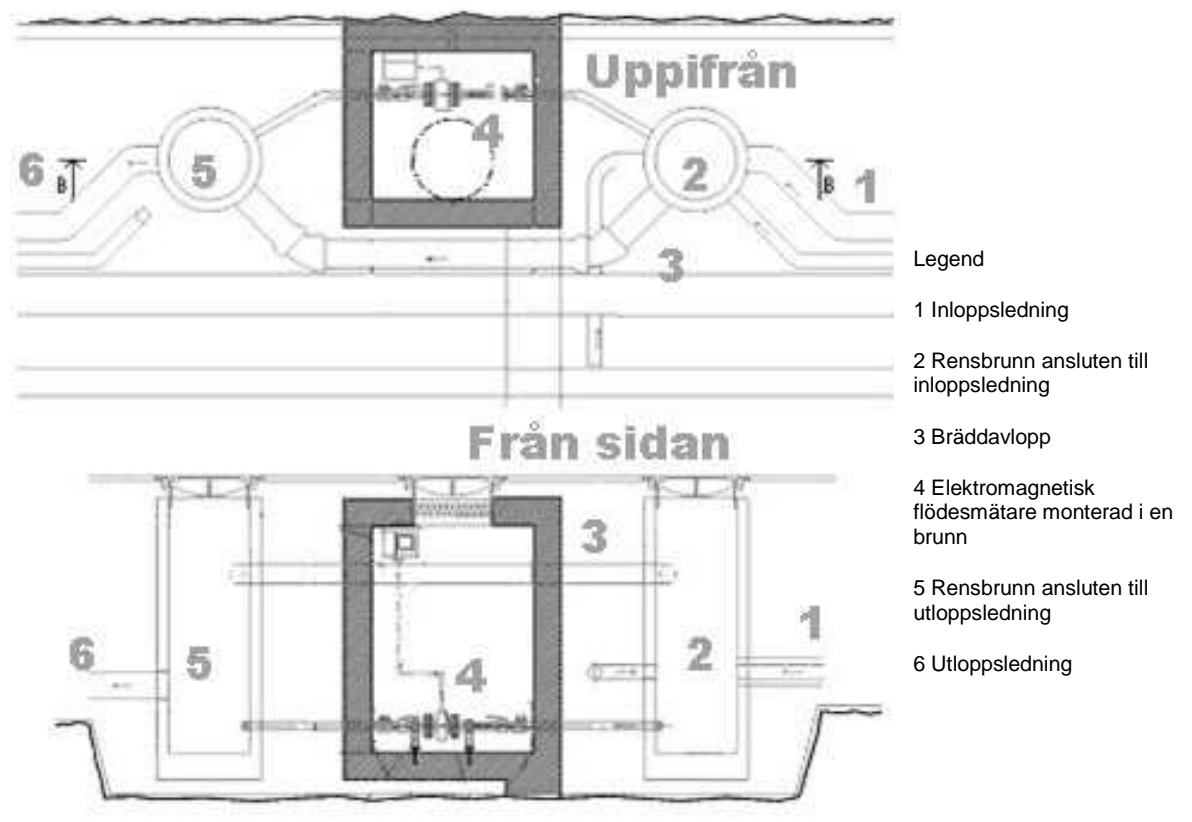
Elektromagnetiska flödesätare anslutna till rör.

Elektromagnetiska flödesätare anslutna till rör, har använts i tunnlar under många år. Mätprincipen bygger på Faradays induktionslag som innebär, att när en ledare (fluid)

rör sig genom ett magnetfält (mätrör) ger detta upphov till en inducerad spänning. Utgående från mätarens tvärsnittsarea och jonernas hastighet så kan flödet bestämmas. De elektromagnetiska flödesmätarna ansluts vanligen med hjälp av en fläns till aktuell ledning. Standardmätare förutsätter att hela tvärsnittsarean skall vara fyll med vatten. Vid val av flödesmätarens mätområde så bör dämpningsgränsen uppströms mätaren beaktas. Vidare så minimeras avsättningar i mätaren om flödes hastigheten är hög, se avsnittet 3.2.3.

Vanligen är givarna fabrikskalibrerade vid leverans. Noggrannheten för kalibrerade och idealt monterade mätare brukar anges till ca. $\pm 0.5 - 1\%$ av aktuellt värde, för värden över en nedre mätgräns. Man bör undvika att använda mätare där de förväntade flödena ligger under ”nedre mätgräns. För mätningar under fältförhållanden där exempelvis smuts kan påverka flödesarean kan kanske felet uppgå till $\pm 5\%$ av aktuellt värde.

Det finns många mätkonstruktioner med elektromagnetiska flödes mätare. Ett exempel kan ses i figur 3-16.



Figur 3-16. Översiktlig skiss på en mätkonstruktion med elektromagnetisk flödesmätare som använts i väg tunneln Södra länken.

Dopplermätare anslutna på utsidan rör

De dopplermätare som används för att mäta vätskeflöden i rör, kan antingen vara ansluten på röret med hjälp av flänsar eller vara ansluten på utsidan röret.

Mätprincipen grundas på att ultraljud sänds ut från en sensor på utsidan röret. Partiklar eller luftbubblor i vätskan reflekterar ultraljudsvågorna. Partiklarnas rörelse förändras frekvensen på de returnerade ljudvågorna. Detta förhållande kan användas för att bestämma hastigheten i en del av tvärsnittsarean. Vattenhastigheten och tvärsnittsarean användas för att beräkna flödet i röret. Mätare finns för exempelvis dimensionerna DN 50-DN400.

Mätområden och noggrannheter för utanpåliggande dopplermätare

Mätområde (två typer) (m/s)	Noggrannhet % av fullt mätområde
0.03-12	+/-2
0.5-20	+/-1

Vid mätningar gjorda med sensorn monterad på utsidan rör kan det vara svårt att avlägsna avlagringar på insidan röret och därmed blir de i mätaren inlagrade uppgifterna felaktiga med avseende på; material, mått på väggjocklek och innerdiameter. En enklare studie gjordes i Norra Länken där tre ultraljudsmätare seriekopplades, men monterades på olika typer av rör, som även hade något varierande dimensioner. Med de inlagrade dimensionerna och aktuella materialen erhöles en största skillnad på i mätvärden på ca. 10 %.

3.2.6 Flödesmätningar från dräner

Flödesmätningar i dräner görs vanligen bara i forskningssyfte.

3.2.7 Flödesmätningar av små inläckage från väggar och tak

Under främst byggsleden görs karteringar som omfattar bl.a. dokumentation av små inläckage i väggar, anfang och tak. Detta inläckande vatten kommer om ingen speciell avledning görs att involveras i dräneringsvattnet. Fukt som sprids över väggar kan dock avdunsta och följa med ventilationen under vintern, se avsnittet 2.2.1. Vanligen kommer det in mer vatten i tunneln botten än från väggarna. Oftast görs dock inga karteringar av dessa små inflöden under byggskedet då dessa är svåra att genomföra och då de inte bedöms få någon betydelse i trafikutrymmet.

För kartering av enskilda små inflöden har både Väg- och Banverk använt samma klassindelning, se tabell 3-2.

Tabell 3-2. Ban- och Vägverkets klassindelning av enskilda inläckage.

Begrepp	Antal droppar/minut	Liter/minut
Fukt	<1	$<0,05 \cdot 10^{-3}$
Dropp	≥ 1	$\geq 0,05 \cdot 10^{-3}$
	≤ 150	$\leq 7,5 \cdot 10^{-3}$
Rinnande	>150	$>7,5 \cdot 10^{-3}$

3.2.8 Inverkan på flödesmätningar utgående från vald pumpteknik

Vattenpumpar används till tunnlar för flera olika applikationer; bl.a. för:

- läns-pumpning av tunnel vid passage av större zoner.
- pumpning av vatten till sedimentationsanordningar i tunneln.
- pumpning av vatten från front eller från pumpgropar till ytan eller till någon mellannivå och därefter upp till ytan.
- pumpning av vatten upp till någon mobil mätanordning.

De pumpar som används i tunnlar skall klara att pumpa vatten som innehåller slam.

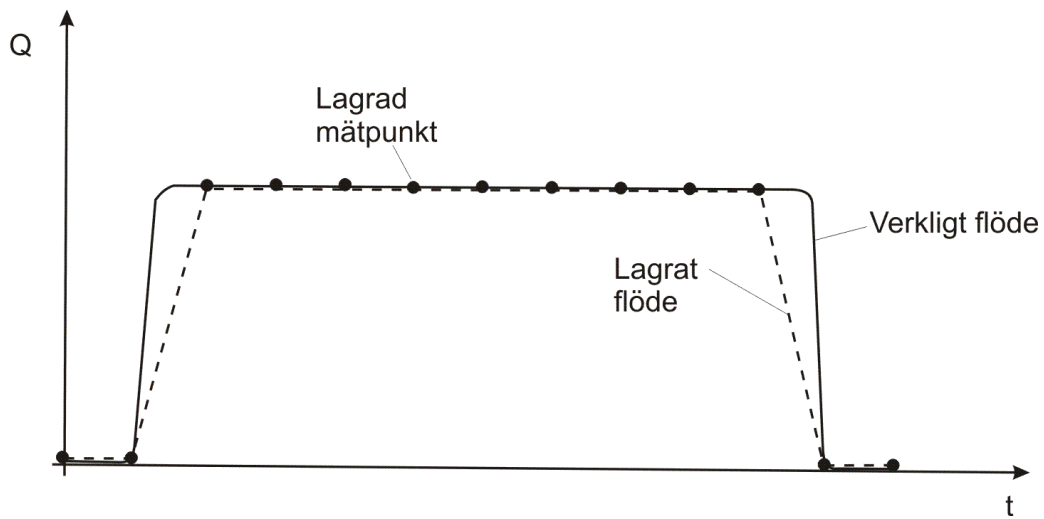
Pumptyper

Pumptyp väljs bl.a. utgående från; pris, förväntade pumphöjder och kapaciteter, samt hur pumpen skall fungera i den aktuella applikationen.

Pumpningar har påverkan på mätförfarandet och mätnoggrannheter.

Exempel:

- Om flödesmätningar baseras på tömningar av en pumpgrop med känd volym, så skall tömningen vara snabb (hög kapacitet) och när pumpen stoppas skall inte vatten gå tillbaka via pumpen till pumpgropen,.
- Om pumpning av vatten görs med konstant nivå i en pumpgrop så görs detta ofta med dräneringspump med hög kapacitet, monterad på en konstant nivå i pumpgropen. Vid pumpningen kommer den att sörpla både luft och vatten, vilket påverkar de mätvärden mätta på avloppsledningen.
- Om mätningar av inläckage baseras på pumpning från pumpgrop med registrerande flödesmätare så bör mätaren vara anpassad till de förväntade flödesvariationerna under pumpningen. Detsamma gäller lagringsfrekvensen av mätvärden, se figur 3-17.



Figur 3-17. Skillnad mellan verkliga och lagrade flöden vid pumpningar från en pumpgrop. Den procentuella skillnaden i beräknade volymer beror av lagringsfrekvens och pumpperiodens längd.

Centrifugalpumpar och deplacementpumpar har varit de mest vanliga pumptyperna i tunnlar, men även specialanpassade kolvpumpar har använts

Centrifugalpumpar kan vara konstruerade på olika sätt, exempelvis :

- vara av typ en- eller tvåsteg.
- vara monterade horisontellt eller vertikalt.
- vara monterade i vattnet eller ovan vattnet och vara försedd med en sugslang.
- vara normalsugande (ej självevakuerande) eller självsugande (självevakuerande).
- ha öppna, halvöppna eller slutna pumphjul.

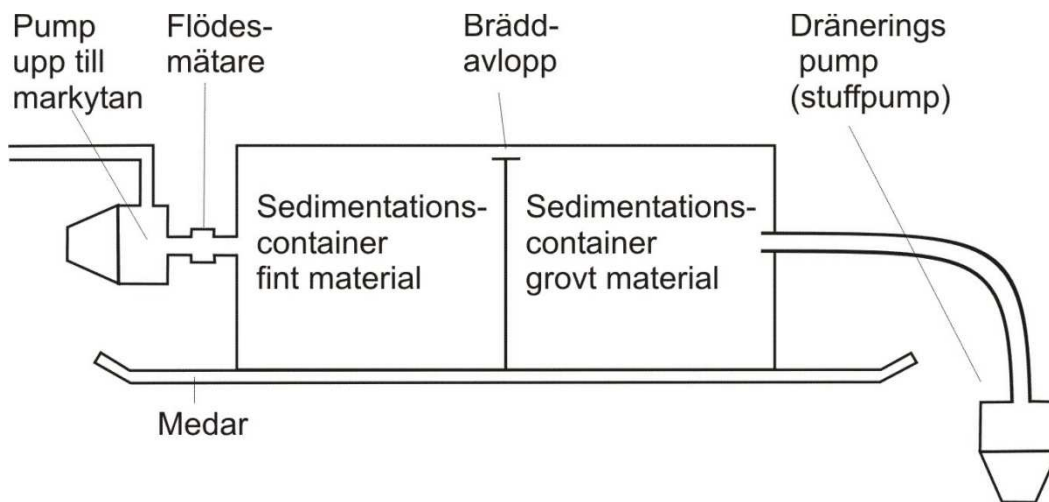
På grund av sediment i vattnet har de flesta av centrifugalpumpar för tunnlar och gruvor öppna eller halvöppna pumphjul, dessa ger dock i allmänhet lägre pumphöjder än de med slutna pumphjul. Vanligen brukar pumparna vara av typ ensteg därmed bara klara pumphöjder upp till ca 30-40 m. Om stora tryckhöjder önskas så brukar vattnet pumpas upp till ovanliggande nivåer och sedan upp till ytan eller så brukar pumpar seriekopplas.

Det finns flerstegspumpar för sk. "gråvatten". En del leverantörer menar att dessa borde fungera också för pumpning av det slamvatten som finns i tunnlar, men att slitaget kan bli stort.

Deplacementpumpar omfattar bl.a. excenterskruvpumpar och kugghjulspumpar. Exenterskruvpumpar är robusta och passar för att pumpa slamvatten. Varvtalet styr kapaciteten. När pumpen startar går den omedelbart upp till det inställda flödet oavsett mottryck. Pumparna finns dimensionerade för olika tryckklasser, exempelvis 12 bar.

Pumpstationer vid tunnelfront.

Det finns många varianter på konstruktioner över pumpstationer som använts för att pumpa vatten från tunnelfronter. Vanligen är den mesta av utrustningen monterad på en släde med medar så att enheten lätt kan förflyttas när tunnelstuff förflyttas, se figur 3-18. Dräneringspumpen (stuffpumpen) som pumpar vattnet från tunnelgolv eller pumpgrop till sedimentationscontainern kan vara vanligen en sänkpump som monteras i gropen kan vara en sugpump som monteras på släden. Sedimentationscontainrarna kan antingen vara konstruerad så att de byts ut när sedimentnivån blir för hög eller vara konstruerade så att sedimenterade materialet är lätta att tömma på plats. Den pump som pumpar vattnet upp till ytan eller till en högre nivå är vanligen dimensionerad för höga pumphöjder



Figur 3-18. Översiktlig konstruktion över en pumpstation som används vid tunnelfront.

Reglering av av pumpflöden

Ur mätteknisk synpunkt kan det vara en fördel att pumpflödet är anpassat till det flöde som rinner in till uppsamlingsanordningen. Detta kan göras genom att;

- pumpen monteras på en konstant nivå i en grop, varvid pumpen tillåts suga luft om tillrinningen är mindre pumpflödet. Det luftblandade vattnet medför dock problem vid flödesmätningen.
- pumpen styrs utgående från inflödet av vatten. För detta behövs en pumpstyrning och en nivågivare. Vanliga styrningar är s.k. frekvensstyrningar.

Vissa pumpar är förberedda för frekvensstyrning. Det finns också pumpleverantörer som även levererar styrningar. Många av styrningarna är dock inte så noggranna.

3.2.9 Sammanställ kostnadsfördelningar för anläggning av mätvall och installation av mätdon

Olika tunnlar kan innehålla olika typer av mätanordningar för att mäta inläckage.

Exempel på mätanordningar för hela tunnlar:

- Många mätvallar och några pumpgröpar.
- Några mätvallar och en pumpgrop
- En mätvall vid inloppet till tunneln och en vid utloppet, om vattnet rinner med självfall från inlopp till utlopp.
- Enbart en pumpgrop

De kostnader som redovisas nedan är skattade för en mätanordning (en mätvall) under antagande att:

- infrastruktur i finns på plats i form av exempelvis borr- och injekteringsaggregat, samt personal.
- anläggningen består av en mätvall och en mätlåda.
- att inkoppling av sensorer kan göras till en närbelägen ledning.

De skattade kostnaderna baseras på intervjuer med folk som varit ansvariga eller deltagit i byggnationerna. Utgående från erhållna svar har kostnaderna för anläggningarna skattats till:

Mätvall anlagd före driftskedet med manuell mätning	40 000-60 000* kr
Mätvall anlagd före driftskedet, med registrerande mätare kr	200 000-230 000*
Mätvall anlagd under driftskedet med registrerande mätare kr	300 000-330 000*

*Om mätvallarna ridåinjekteras så ökar kostnaderna med ca. 50 000 kr

Fördelningen av kostnaderna för de billigaste mätstationerna med registrerande mätare är ca 40% mantid och 60 % material, inklusive sensorer. För den dyraste anläggningen så blir förhållandena 80 % mantid och 20 % material. Orsaken till att andelen mantid blir så hög så i drifttagna tunnlar är att i dessa finns eller kan finnas störande installationer (räls mm), ej detonerade sprängämnen och att arbeten bara kan utföras under kortare perioder under ett arbetspass.

När det gäller underhåll och skötsel av systemen så har de intervjuade haft svårt att skatta kostnaderna. Dessa varierar också mycket beroende på vad som ingår i underhåll och skötsel samt antalet mätanordningar.

Exempel på erhållna svar:

- 1 timme/mätanordning per vecka, vilket motsvarar ca 25 000 kr/år
- Ca 50 000 kr/mätanordning och år, involverande inmatning och kontroll av mätdata.

Till de skattade kostnaderna ovan skall läggas kostnader för att ersätta utrustningar som slutat att fungera.

3.3 Kapitel 3, sammanfattning

Mätsystem utomlands

I studien gjordes en internationell utblick omfattande; regelverk, mätanordningar och mätstrategier när det gäller mätningar av inläckande vatten till tunnlar. För att inhämta uppgifter så kontaktades några konsultföretag, myndigheter och entreprenadföretag i bl.a.: Australien, Norge, Österrike, Schweiz, USA.

Den generella bilden är att mätningar av inläckande vatten till tunnlar inte görs med standardiserade metoder som rekommenderas av myndigheter. Krav på maximalt inläckage per längd tunnel (totalt eller för vissa delsträckor) finns ofta angivna, men mätningarnas mätosäkerhet är inte i fokus, och inga statliga organ har tagit fram övergripande metodbeskrivningar eller motsvarande. Några av de studerade projekten hade detaljerade kontrollprogram för kontrollmätningar, underhåll och avrapportering.

Mätanordningarna verkar likna de svenska. Mätningar görs av totalflöden från pumpar, sedimentationsbassänger, mätvallar. Mätöverfall (V eller rektangulärt) verkar vara vanliga, men även H-rännor förekommer. Vattennivåerna som används för att utvärdera flöden, mäts vanligen med en registrerande nivåmätare.

Ofta orsakas hårdare krav, rutiner och mer medveten kontroll av inflöden som en konsekvens av uppkomna problem. Det kan vara kraftigt avsänkta grundvattenytor som kan orsaka miljöproblem i tunnelns närhet, sättningsproblematik med skadeståndskrav eller att inläckande vatten försvårar tunneldrivningen i byggskedet.

Utgående från de kontakter som tagits så verkar det inte finnas några av myndigheter fastställda regelverk eller rekommendationer, när det gäller inläckagemätningar. I USA har dock NHI tagit fram ett dokument som innehåller vissa rekommendationer för tillåtna inläckage till några olika tunnlar. I skriften ligger dock fokus på uppföljning av omgivningspåverkan.

Mätsystem i Sverige

Inläckage till tunnlar i Sverige har mätts; för hela eller delar av tunnlar, under bygg- och driftskeden. Sektionsvisa mätningar under driftskedet har hittills ej varit så vanliga men kan komma att bli mer frekventa i framtiden.

Anläggning av mätanordningar har av en del entreprenörer setts som störande moment vid utbyggnaden av tunnlar, varför de inte prioriterats.

Valet av mätprinciper har inte alltid gjorts utgående från; förväntade flöden, förväntad mätosäkerhet på mätvärden samt önskad mätfrekvens.

Inläckagemätningar görs ofta då ingen annan aktivitet pågår i tunneln men även då olika aktiviteter pågår. Det inläckande vattnet måste då kunna separeras från det ovidkommande vattnet. Det processvatten som kommer in i tunneln mäts vanligen med en mätare på tillloppsledningen.

Sektionsvisa flöden längs tunnlar har antingen mätts i varje sektion eller beräknats från kumulativa flöden längs tunneln.

Vid mätningar installeras någon typ av uppsamlingsanordning för vatten (ex mätvall, dike eller grop) i det avsnitt på tunneln där mätningar skall göras.

Uppsamlingsanordningarna har vanligen anpassats för lutningsförhållanden på den aktuella platsen. Ofta har dessa uppsamlingsanordningar tagit borts efter byggskedet.

Flera mätprinciper har använts för att mäta flödena till/från uppsamlingsanordningar bl.a.:

- Tömningstid av ett magasin med en känd volym, med hjälp pump (pumpgrop)
- Gångtid på en pump med en känd pumpkurva samt känd tryckhöjd (pumpgrop)
- Pumpning från ett magasin via en registrerande flödesmätare (pumpgrop)
- ”Hink och klocka” (mätvall)
- Mätöverfall (mätvall)
- Registrerande flödesmätare (mätvall)
- Mätrännor (öppna diken).

Ibland utgör pumpar en viktig komponent vid vissa flödesberäkningar, exempelvis vid cykliska tömningar av pumpgropar. Om pumpar är involverade så bör deras påverkan granskas med avseende på de beräknade flödena..

Vid beräkningar av flöden i mätöverfall och mätrännor så grundas dessa på mätningar av nivåskillnader upp- och nerström en förträngning på en mätanordning. Nivåerna mäts vanligen med mätsticka, tryckgivare eller dopplermätare

Ur mätosäkerhetssynpunkt är det viktigt att utvald mätartyp är anpassad för de förväntade flödena på den aktuella platsen.

Vid mätningar i slutna rör så har elektromagnetiska- och vinghjulsmätare använts. Tidigare betraktades vinghjulsmätaren som en ren volymsmätare, nyare mätare har försetts med elektronik så att momentana flöden kan erhållas. Även dopplermätare för montage utanpå rör har testats.

Erfarenheterna av gjorda installationer med registrerande mätare är att det är viktigt att elektronik skyddas från smuts och fukt.

Kostnader för mätvallar har skattats enligt följande:

Mätvall anlagd före driftskedet med manuell mätning	40 000-60 000* kr
Mätvall anlagd före driftskedet, med registrerande mätare kr	200 000-230 000*
Mätvall anlagd under driftskedet med registrerande mätare kr	300 000-330 000*

*Om mätvallarna ridåinjekteras så ökar kostnaderna med ca. 50 000 kr

4 Sammanställning över bra, befintliga och prisvärda mätanordningar, samt förslag på nya konstruktioner

I avsnittet 1 ”Sammanställning över nuvarande och framtida krav på inläckagemätningar i olika typer av tunnlar”, redovisas krav och villkor som kan redovisas i miljö- och arbetshandlingar involverande tekniska beskrivningar.

Exempel på krav:

- Maximala inläckage för tunnelavsnitt och/ eller för hela tunneln för både bygg- och driftskedet.
- Mätvallar skall installeras för både bygg- och driftskeden eller bara under en av perioderna.
- Mätvallars utformning
- Mätfrekvens och hur mätdata skall redovisas
- Skötselinstruktioner av mätanordningar.

Är handlingarna detaljerat skrivna så finns det inte många frihetsgrader för att utforma alternativa mätanordningar.

Nedan redovisas användbara mätanordningar som ibland inte uppfyller alla de tänkbara krav som kan finnas i de olika handlingarna.

4.1 Sektionsvisamätningar där läckagekraven är maximerade till 1 L/min per 100 m tunnel

Om inläckagekravet för en sektion i en tunnel är satt till maximalt 1 L/min per 100 m tunnel alternativt 100 m tunnelrör, så är det möjligt att tolka in att flödet inklusive mätfel kan få vara mindre än 1,5 L/min. Det innebär att felet måste vara mindre än 0,5 L/min om det beräknade flödet är 1 L/min.

Att ha kontroll på så små flöden förutsätter god detaljkunskap om olika vattentransporter inom den aktuella sektionen.

Oavsett om gränsvärdet är satt för bygg- eller driftskeden så bör det göras en noggrann analys av vilka förutsättningar som kan komma att råda i det aktuella tunnelavsnittet under olika tider. Den kan exempelvis omfatta påverkan brytningsteknik under byggskedet eller påverkan av inbyggnader under driftskedet.

I kapitel 2 redovisas skattningar på faktorer som kan påverka mätosäkerheten på inläckagemätningar, vid lågt satta maximalt tillåtna inflöden.

I avsnittet 2.2.6., diskussioner, ges ett förslag vad man bör/skall beakta när en mätvall utformas för ett tunnelavsnitt med ansatta maximala inläckage, som skall understiga ca. 2 L/min per 100 m tunnel.

I avsnittet 2.3 ges ett förslag på hur man kan redovisa mätosäkerheter på uppmätta låga inflöden.

4.2 Mätningar under byggsleden

Bl.a. följande har framförts angående mätningar under byggsleden:

- Det tar för lång tid att få igång mätningar
- Mätningarna stör arbetet med utbrytningen
- Mätningar är för dyra både under bygg- och driftskeden.
- Mätningar innehåller ofta stora fel.

I de metoder som presenteras nedan så har även kumulativa mätningar medtagits, dvs mätningar där allt vatten uppströms kommer till den aktuella mätpunkten. Vid sektionsvisa beräkningar utgående från sådana mätningar minskas flödet vid nedre sektionsgränsen med flödet vid den övre gränsen. Denna metod är inte lämplig om det ställs höga krav inläckagebestämningarna till de olika sektionerna

Mätningar av flöden vid tunnelfront

Det vatten som kommer till tunnelfronten (processvatten och inläckande vatten längs tunneln) pumpas vanligen bort och mäts med en mobil enhet. Exempel på befintliga konstruktioner redovisas i avsnittet 3.2.8. Pumpstationer.

Följande förbättringar skulle kunna göras på utrustningen:

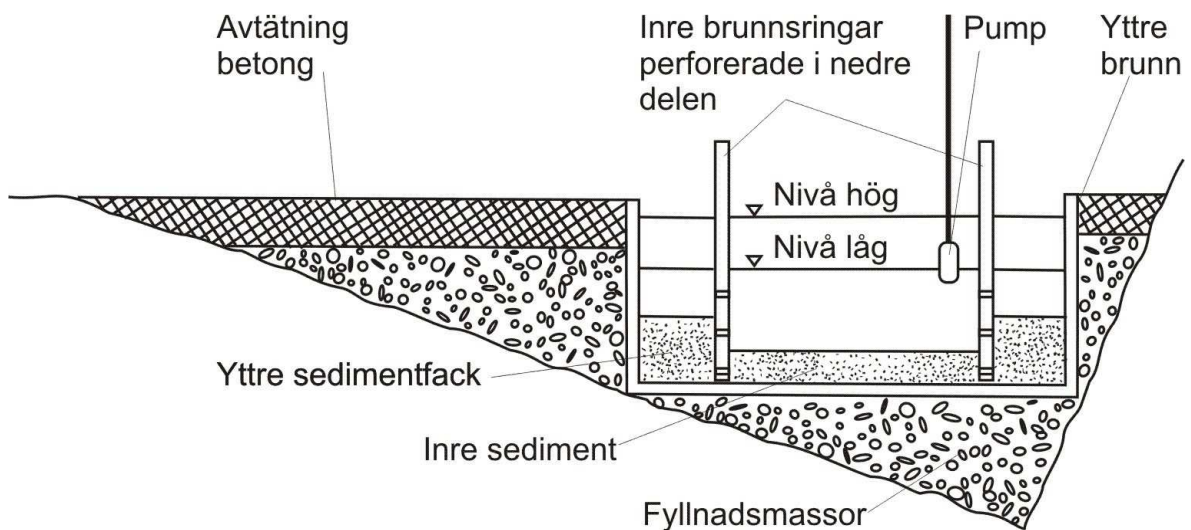
För att kontinuerligt mäta det totala flödet som kommer till tunnelfronten, kan utrustningen vara konstruerad enligt figur 3-18 ovan. Dock kan pumpen som pumpar upp vattnet till markytan bytas till en pump som är anpassad för frekvensstyrning, där frekvensstyrningen styrs med avseende på att hålla konstant nivå i sedimentationsbehållare nr 2 (containern för fint sedimentationsmaterial). Om denna nivå ligger ovan intagspunkten för pumpen så undviks att luft kommer in i ledningarna och därmed ökar förutsättningarna att flödesmätningarna på uppumpat vatten blir noggrannare.

Den nivåmätare vars signal används vid frekvensstyrning av pump, kan utgöras av en tryckgivare. Lämplig pump för frekvensstyrning är exempelvis exenterskruvpumpar. Fördelen med att detta sätt kontinuerligt pumpa och mäta flöden från tunnelfronten är man kommer bort från de fel som presenterades under avsnittet 3.2.8. Om en sådan konstruktion tas fram bör påverkan av slam beaktas extra mycket.

Mätningar av inläckage med hjälp av anlagda pumpgropar

I tunnlar som bara har inläckagekrav satta för hela tunneln, men där ändå information är av intresse från tunnelavsnitt, kan pumpgropar anläggas med lämpliga intervall. Ibland kan lutningsförhållandena i tunneln vara så att pumpgropar måste anläggas längs tunneln. Själva pumpgropen kan anläggas exempelvis enligt "Banverkets koncept", som beskrevs i avsnittet 3.2.2. Pumpgropar. I en sådan grop kan dock sediment avsättas på sluttningarna ner mot gropen, vilket kan innebära att felaktiga volymer erhålls om man använder pumpprincipen med att registrera antalet tömningar. Detta fel skulle minimeras om pumpningen gjordes med frekvensstyrda pumpar så att nivån hölls konstant i gropen.

En alternativ inredning av en pumpgrop kan ses i figur 4-1. Efter det att pumpgropen sprängts ut avjämnas bergytan med betong. Två standardbrunnar installeras i gropen.



Figur 4-1 Pumpgrop inredd med brunnringar

Den yttre brunnen som även har en brunnsbotten och avtätas i övre delen mot berg med ett betongskikt. Den inre brunnen kan utgöras av bara brunnringar som i nedre delen kan vara perforerade. Med konstruktionen erhålls två sedimentationsvolymer, en mellan ringarna och en innanför inre ringen. Dessa volymer kan rensas med en slamsug.

I den övre delen av brunnen erhålls en väldefinierad volym som inte påverkas av sedimentation, i det fall man önskar att utnyttja pump- och mätprinciper som grundas på snabba tömningar av en känd volym, se avsnittet 3.2.8. Pumptyper.

Mätningar av inläckage med hjälp av spårämnen

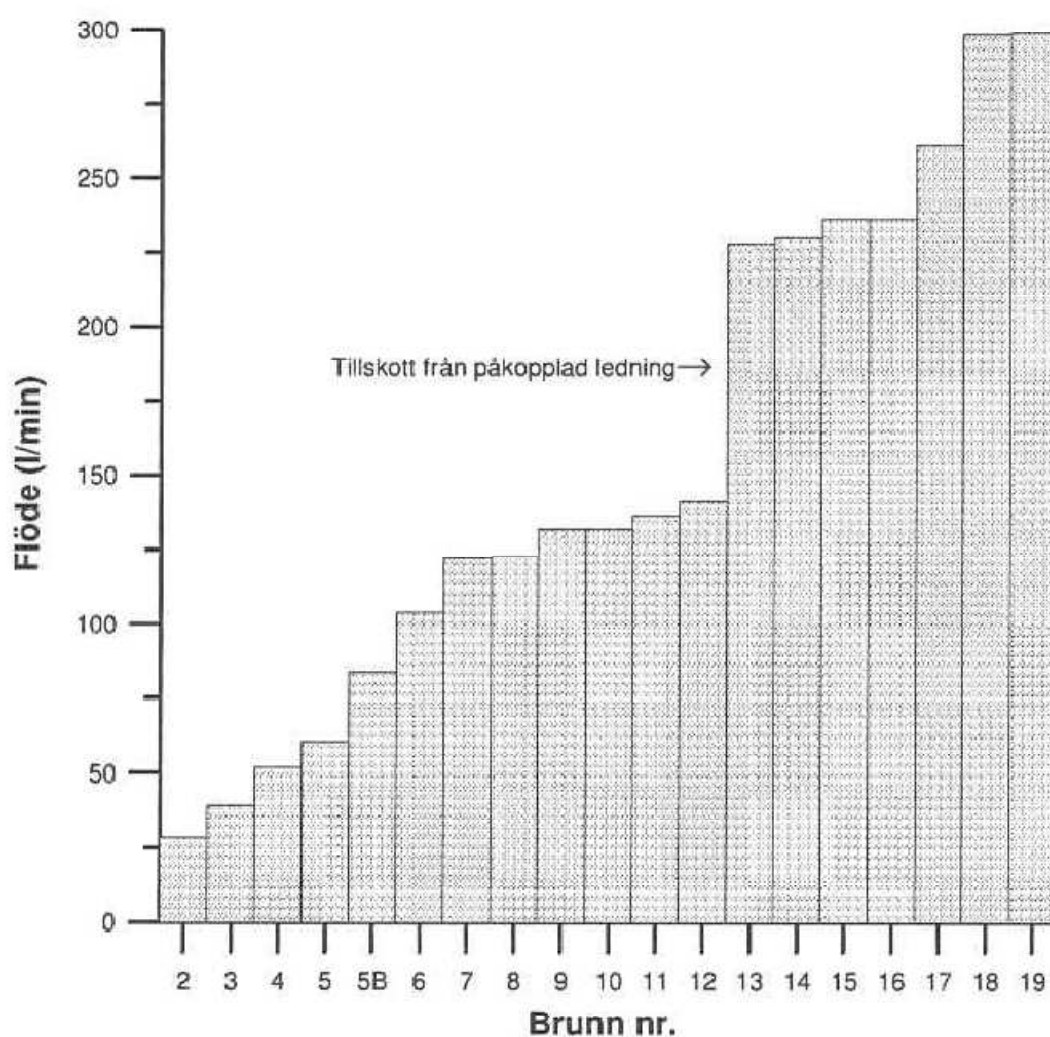
Geosigma AB har utvecklat en metod för att mäta inläckage i spillvattenledningar. En tunnel påminner till sin funktion mycket om en läckande spillvattenledning. Även i en spillvattenledning så är vattnet smutsigt, dock finns det vissa skillnader i sammansättningen av "smutsen" mellan tunnlar och sådana ledningar.

En flödesmätning längs en spillvattenledning utförs genom att tillsätta ett spårämne uppströms en samlingsledning. Spårämnet transporteras nedströms och späds efterhand ut i proportion till inläckaget av ovidkommande vatten. Spillvattnet i brunnarna

nedströms provtas och spårämneskoncentrationen analyseras på plats eller i ett enklare laboratorium. Flödet i respektive provtagningsbrunn kan då bestämmas. Rätt utförd är metoden mycket snabb och noggrann, varför en lång sträcka kan undersökas snabbt. Under en "mät natt" brukar man hinna med en sträcka på 2-3 km om brunnarnas avstånd är ca 50 m. Mätningar görs ibland både vid uppehållsväder och vid regn för att detektera felkopplingar mellan dagvatten och spillvattenledningar.

De spårämnen som Geosigma använder är biologiskt nedbrytbara och ej hälsovådliga. Dessa kan detekteras i ytterst låga koncentrationer, osynliga för ögat, varför flöden kan mätas inom ett brett intervall med hög noggrannhet.

I figuren 4-2 redovisas exempel på en mätning i en spillvattenledning. Man kan leka med tanken att brunnnumren motsvaras av provtagningspunkter i en tunnel.



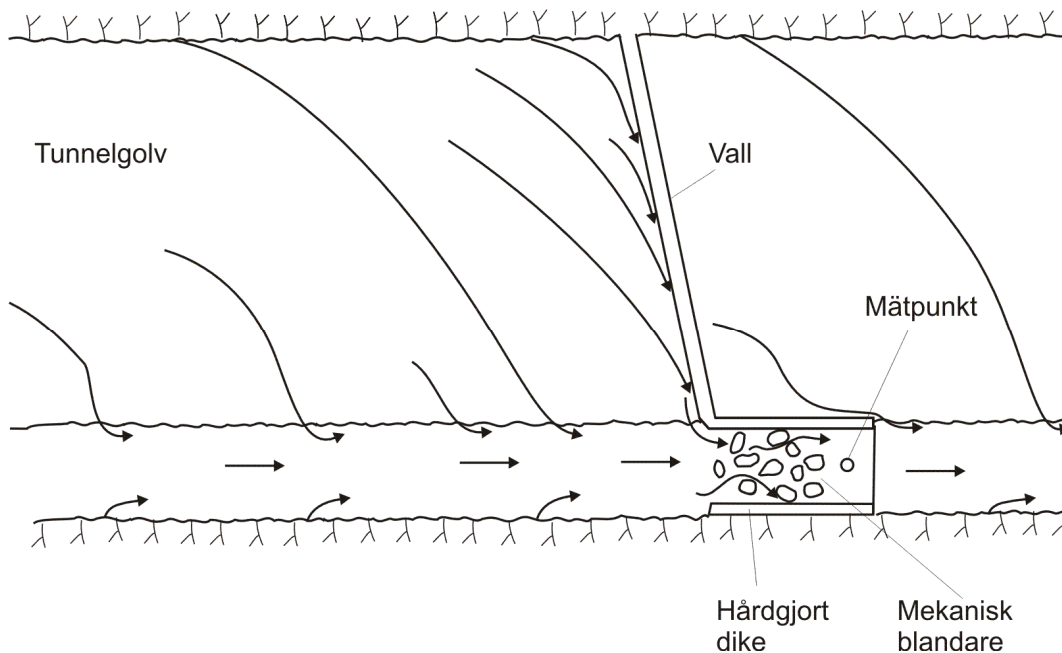
Figur 4-2. Uppmätta flöden i brunnar längs en spillvattenledning.

Anpassning av befintlig metod för mätningar i spillvattenledningar till inflödesmätningar längs tunnlar

Mätningar kan göras på:

- vilka längdavschnitt som helst längs tunneln. Beroende på lutningsförhållanden längs och tvärs tunneln så behöver inte det beräknade inflödet i den aktuella mätpunkten representera den exakta inflödespunkten i tunneln. Den kan vara en bit uppströms, se flödeslinjer i figur 4-3
- förutbestämda längdavschnitt, där begränsningar finns i form av vallar
- på platser där mindre tunnlar ansluter till huvudtunneln

För att mätvärdena skall vara representativa för mätplatsen så skall omblandningen omedelbart ovan platsen vara god. I diken med sten och grus blir omblandningen god på relativt kort sträcka. I figur 4-3 redovisas ett förslag där mätningar vid varje sektionsavgränsning och där avgränsningar görs med en låg mätvall. Det vattnet som kommer ut till diket via vallen så kan behöva omblandas innan mätning görs. Det kan göras genom att en kortare sträcka av diket hårdgörs med betong. I denna del installeras någon typ av mekanisk blandare, som kan utgöras av exempelvis stenar, se figur 4-3.



Figur 4-3. Planskiss över förslag till mäthanordning som kan användas för att mäta flöden längs en tunnel med hjälp av utspädningsmätningar.

Vid mätning tillsätts någon typ av spårämneslösning kontinuerligt i de högre delarna (exempelvis tunnelmynningen) av flödesvägen.

Mätningen utförs antingen manuellt på önskade provtagningsplatser, eller mäts automatiskt med sensorer som installerats på några platser längs tunneln.

Det finns en rad spårämnen som har olika för och nackdelar.

Salt (NaCl)

Fördelar:

- Billigt
- Lätt att detektera
- Vattentroget spårämne
- Finns robusta mätare som tål tuffa miljöer.

Nackdelar:

Litet mätområde (två dekader), då bakgrundshalterna på det inläckande vattnet i djupare belägna tunnlar kan vara relativt höga.

Färgspårämnen. (ex. "Uranin", Rhodamine WT, Amino G)

Fördelar:

- Teoretiskt mycket stort mätområde. I labb upp till 8-10 dekader med fältutrustning (fluorometer) 3 dekader
- Relativt billig
- Mätresultat erhålls direkt i fält med fältutrustning.

Nackdelar:

- Även om vattenproverna filtreras i fält så kan det bli problem med mätningarna på grund av lerpartiklar. Färgspårämnen kan fastna på lerpartiklar. Det finns i litteraturen redovisade uppgifter som indikerar detta. Då en sådan mätning är relativt enkel att göra i fält, borde en inledande undersökning göras angående påverkan av lerpartiklar.

Det finns ingen bra konstruktion för att göra automatiska mätningar med stationära mätare i fält, eftersom mätningar görs med en optisk metod så är den känslig för smuts och partiklar i vattnet. Därför behöver utrustningarna rengöras ofta.

Joner (ex Jodid och Bromid)

Fördelar:

- Teoretiskt stort mätområde. I fält upp till 4 dekader
- Relativt billig
- Mätresultat erhålls direkt i fält med fältutrustning.
- Är ej så känsligt för smutsigt vatten

Nackdelar:

- Glaselektroden är förstärkt men kan ändå vara känslig för mekanisk påverkan.
- Kräver viss skötsel mellan mätomgångarna. Färdiga kalibreringsvätskor som kan användas i fält finns för att kontrollera eventuella tidsdrifter på givaren.
- Joner kan fastna på lerpartiklar. Det finns troligen i litteraturen redovisade uppgifter om detta, annars är en sådan mätning relativt enkelt att göra.
- Bakgrundskoncentrationerna på aktuella joner kan vara relativt höga i grundvattnet, speciellt i djupare belägna tunnlar.

Upplösningen i mätningarna beror av:

- Den initiella koncentrationen på spårämneslösningen och spårämnesflödet
- Mätarens mätområde
- Upplösning och noggrannhet på mätvärden.

Även om flera mätutrustningar har stora mätområden och stor upplösning, så torde upplösningen i flödesmätningen vara ca 1 % av slutflödet om även mätarens noggrannhet innefattas. Det är dock viktigt att omblandningen av spårämnet längs tunneln är god

Exempelvis om totalflödet längst ner på mätsträckan är 100 l/min, så borde vi kunna skatta inflöden ner till ca 2 l/min på varje mätpunkt. Om en mätning görs i vardera 10 avsnitt av en tunnel skulle så skulle de utvärderade inflödena till dessa punkter kunna fördela sig enligt följande (10, 2, 8, <2, <2, 20, 30, 6, <2, 22 l/min).

En alternativ god bestämning av totalflödet vid den nedersta mätpunkten (kanske utgående från pumpning från en pumpgrop) ökar säkerheten i bestämningarna av inflödena till de aktuella punkterna.

Fördelen med spårämnesmetoden är att den går att använda i tidiga byggskedan när inga andra mätanordningar är installerade

Sektionsvisa mätningar med hjälp av grunt tvärgående dike

Om lutningsförhållandena är gynnsamma så kan vatten från en mätsektion styras över till den ena sidan av väggen med hjälp av ett grunt dike i bergbotten. Hur grunt diket kan göras beror på undulationen av bergbotten.

Omedelbart nedströms tvärdiket kan flödesmätningar göras i det längsgående diket vid tunnelvägg med en mätare anpassad för en öppen kanal, se avsnittet 3.2.4. Vid utvärdering av inflöden till den aktuella sektionen minskas flödet i den aktuella mätpunkten med mätpunkten uppströms sektionen. Diket skulle kunna anläggas genom att vid borrningen på den aktuella platsen öka stickvinkeln något i golvet. Troligtvis blir det svår att göra borrning och sprängning så att önskat resultat erhålls. . Bättre resultat erhålls troligen om diket borras upp med någon typ av klenare borrutrustning. Väggarna i diket avjämnas med betong.

Diket täcks med en färäst som går att ta bort så att det blir lätt att rensa från lera mm.

Sektionsvisa mätningar med hjälp av en på plats gjuten låg mätvall

Om lutningsförhållandena är gynnsamma så kan vatten från en mätsektion styras över till ena sidan av tunnelväggen med hjälp av en låg mätvall. Med låg menas att höjden kan vara ca 30 cm och minskas upp mot den högsta tunnelsidan. I det fall det finns höjdbegränsningar för mätvall och passerande ledningar så kan ledningarna längs tunneln installeras igenom mätvallen. En del mätare kräver fritt utlopp på utloppssidan mätaren. Detta kan lösas genom att en nästan horisontell ledning installeras från mätvallen och några meter nedströms mätvallen, tills tillräcklig höjd erhålls för mätaren, se figur 4-4. Ledningen kan vara konstruerad så att det kan antingen monteras en fast mätare på ledningen om kontinuerliga mätningar krävs, eller en mobil mätare om kravet är enbart periodiska mätningar, Se avsnittet nedan, Mätningar med mobila enheter.

Mätvallen förankras och kontaktinjekteras. För att fordon skall kunna passera under byggsleden då inga fyllnadsmassor finns på bergbotten så förses mätvallen med en enklare robust överkörningsanordning.

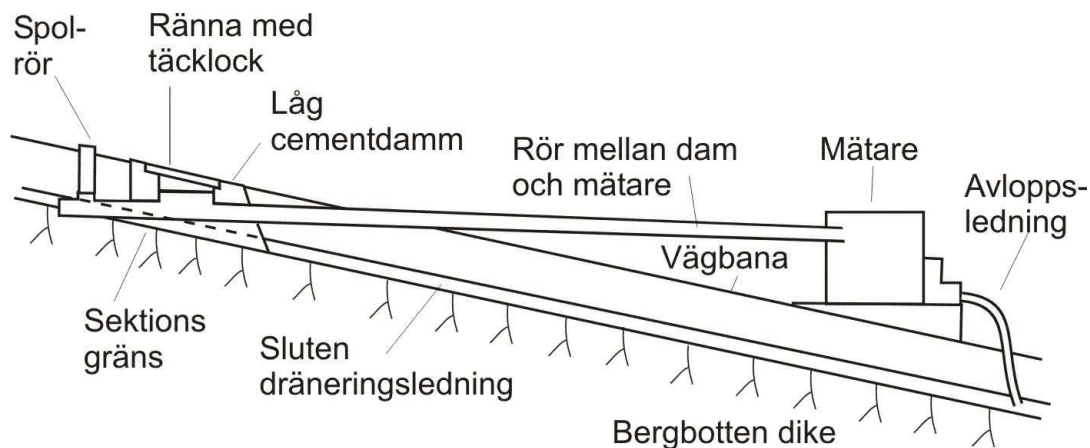


Fig 4-4. Mätanordning för sektionssvisa mätningar av inläckage till Äspö-forsknings-tunnel

Sektionsvisa mätningar med hjälp av en prefabricerad låg mätvall

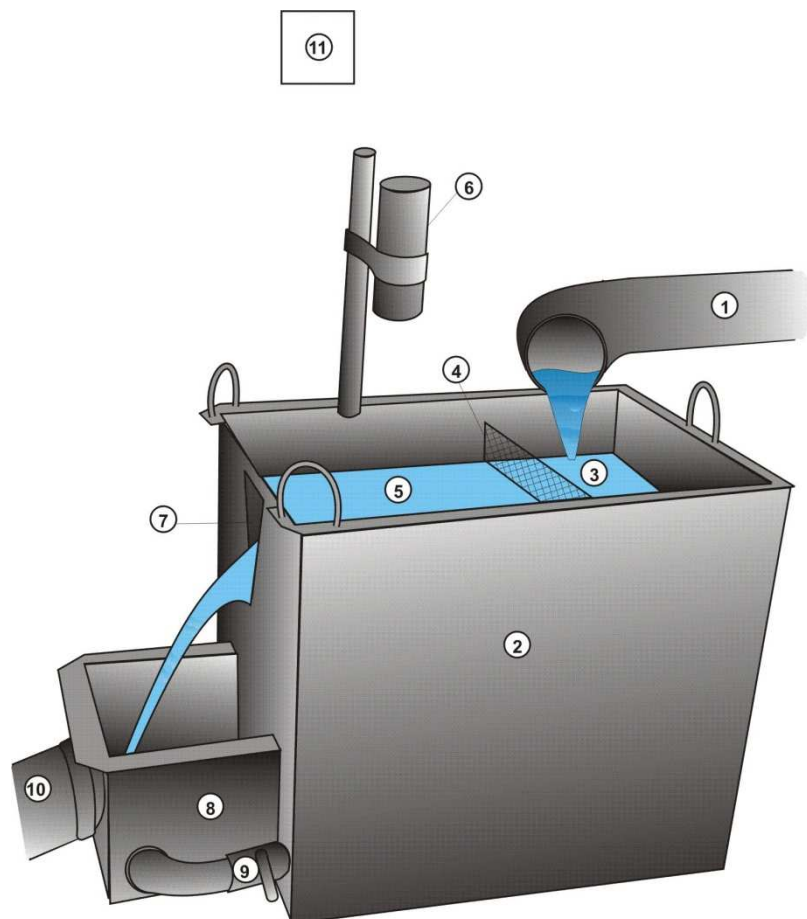
Optimalt utformade prefabricerade låga mätvallar skulle kunna minska kostnader och byggtider för mätvall. Med de varierande förhållanden som kan råda längs tunnlar, så är det inte troligt att det går att ta fram sådan enheter som kan monteras på plats, till ett billigare pris än de som görs på plats.

Mätning med mobila enheter

Om inte kontinuerliga mätningar är nödvändiga så kan periodiska mätinsatser göras med mobila enheter.

I det fall inga mätvallar är installerade så kan anpassningar göras av dikesbotten i de längsgående diket som går längs ena borrhållsväggen, så att mätningar kan göras med mobila mätare för öppna diken, se avsnittet 3.2.4. "Mätrännor för öppna system", "Dopplermätare för öppna rör eller diken", "Elektromagnetiska flödesmätare för icke fyllda rör". Vid denna typ av mätningar erhålls kumulativa flöden längs diket från vilka det kan vara svårt att utvärdera noggranna sektionssvisa flödesvärden

I det fall mätvallar finns installerade så kan exempelvis mobila mätöverfall eller elektromagnetiska flödesmätare anslutas till dessa. Ett exempel på ett mobilt mätöverfall redovisas i figur 4-5.



Figur 4-5 Sedimentationslåda med mätöverfall liknande den typ som används i Äsp-forskningstunnel. Enheten kan användas för såväl fasta som mobila installationer.

Legend

- | | |
|--|--|
| 1. inlopp från dräneringsledning | 7. Skibord |
| 2. Container för sedimentation och flödesmätning | 8. Uppsamlingslåda för utflödande vatten. |
| 3. Sedimentationslåda 1 | 9 "By passledning" med ventil som används bl.a. vid kalibrering. |
| 4. Avgränsning mellan sedimentationslådorna 1 och 2, som vatten kan strömma över eller igenom. | 10. Avlopp till uppsamlingsledning för dräneringsvatten. |
| 5. Sedimentationslåda 2 | 11. Datainsamlare |
| 6. Nivåmätare | |

Fördelar med mobila enheter:

- Det behövs inte så många mätare och det finns möjlighet att välja mätare utgående från aktuella flöden på de olika mätpunkterna
- Då mätarna är få så blir tiden för rengöring och kalibrering kort. Det blir lätt att hålla mätarna i gott trim.

Nackdelar med mobila enheter:

- Mätdata erhålls bara periodiskt.
- Det åtgår en viss tid att förflytta mätare mellan de olika mätpunkterna.

4.3 Mätningar under driftskeden

Inledning

I planerade framtida järnvägs- och vägtunnlar i centrum av stora städer torde sektionsvisa mätningar i tunnelavsnitt att bli mer vanliga även under driftskeden.

Hittills har det ännu med några få undantag inte byggts vägtunnlar där kravet varit att sektionsvisa mätningar skall göras under driftskeden. Vanligen har mäthanordningarna som använts under byggtiden rivits efter det att tunneln brutits ut, eller i några fall fyllts över.

I vissa järnvägstunnlar har enstaka mäthanordningarna använts även under driftskeden. Dessa kan vara installerade i själva huvudtunneln eller i tvärtunnlar mellan två tunnelrör. Även i några tunnelbanetunnlar finns mätvallar installerade som används under driftskeden, se avsnittet 3.2.2, avsnittet uppsamlingsanordningar.

För att kunna göra sektionsvisa mätningar längs en tunnel krävs att det görs någon typ avgränsning vid sektionsgränserna. Avgränsningarna kan exempelvis utgöras av en låg metallvall. Nedan redovisas tänkbara tillåtna mått mellan överkant mätvall och överkant överbyggnad för en järnvägstunnel samt överkant mätvall och överkant beläggning för en tunnelbane tunnel.

Bankroppen i en konventionell järnvägstunnel består av en överbyggnad (vanligen makadam) samt en underballast som ligger på bergbotten. Makadammen i överbyggnaden kan komma att bytas ut under driftskedet. För att bl.a. undvika frysning i ledningar så anpassas mäktigheten på underballasten utgående från de temperaturförhållanden som kan tänkas råda i tunneln på den aktuella platsen. Enligt de typsektioner som redovisas i BV Tunnel så kan exempelvis mäktigheten på underballasten vara ca. 0.8 m. Med en sådan mäktighet är det troligen möjligt att installera en permanent låg mät- eller styrvall med en höjd ovan bergytan på ca 0.3 m. Om någon tagit ett beslut att en mätvall skall installeras på en plats och man önskar att vallen skall vara något högre än 0.3 m, så sänks bergbotten i det aktuella avsnittet så att tjockleken av underballastskiktet som ligger på mätvallen blir minst 0.3m.

Väggkroppens höjd och utformning kan variera mellan olika vägtunnlar. Vägverket har inga anvisade mått på minimala höjder mellan en överkant vägbeläggning och överkant en mätvall. En väggkropp kan exempelvis ha följande uppbyggnad:

- Beläggning ca 20 cm
- Bärlager ca 10 cm
- Förstärkningslager ca 30-50 cm
- Sylta (grovkrossat berg) 10-20 cm.

För att inte gupp skall bildas i vägbanan ovan mätvallar så bör den summerade höjden på bär- och förstärkningslager vara upp mot 50 cm. Förutsättningarna för guppbildning skulle minska något om tjockleken på övre delen på vallen kunde minskas. Exempelvis om vallen består av en 20 mm tjock stålplåt.

Inläckagemätning för hel tunnel

Inläckagemätning för hela tunnlar mäts i allmänhet genom flödesmätning av det bortpumpade dräneringsvattnet som kommer till en pumpgrop eller pumpstation. Det bortpumpade vattnet mäts vanligen med en elektromagnetisk flödesmätare.

Inläckagemätningar för hel tunnel, med information om inläckage för delar av tunneln

I vägtunnlar installeras vanligen samlingsbrunnar för dräneringsvatten med ett mellanrum ca. 150 m. I järnvägstunnlar är motsvarande avstånd ca. 80 m, se avsnittet 3.2.2. Dräneringssystem. I dräneringssystemet med tillhörande samlingsbrunnar kan flödesmätningar göras med hjälp av spårämnen, se avsnittet 4.1 Mätningar med hjälp av spårämnen. Spårämnen kan tillsättas i den samlingsbrunn som är belägen längst upp i dräneringssystemet, varefter mätningar görs i samlingsbrunnar nedströms. Hur bra dessa mätningar representerar en sektion utan avgränsningar i form av mätvall, beror bl.a. på lutningsförhållanden längs och tvärs tunneln. Vidare kan det vatten som tillkommer närmast uppströms en samlingsbrunn få dålig spårämnesomblandning som kan få en viss påverkan av flödesbestämningen i den aktuella punkten.

Flödesmätningar i samlingsbrunnar kan bl.a. användas för att konstatera i vilka tunnelavsnitt inflödena har förändrats om de totala inflödena förändrats.

Mätningar av inläckage i avsnitt längs järnvägstunnlar

Exempel på inläckagemätningar till järnvägstunnlar har hämtats från Citybanan. Avsnitt i denna tunnel kan bestå av en servicetunnel, spårtunnlar, samt tvärtunnlar som förbinder föregående nämnda tunnlar. Avstånden mellan tvärtunnlarna kan variera mellan ca. 100 och 400 m. Detaljplanering av inläckagemätningar till Citybanan var ej slutförd när denna rapport skrevs. Det fanns dock ett utkast till förslag som kan sammanfattas enligt följande:

Under byggskeden så anläggs betongbarriärer (mätvallar) tvärs spårtunnlar och servicetunnel vars avstånd kan vara mindre än avstånden mellan tvärtunnlarna. Höjden på mätvallar relativt den teoretiska schaktbotten kan komma att bli av storleksordningen ca 0.5 m. Mätvallarna kommer att kontaktninjeras och kan komma att ridåinjeras. Vidare förbereds med ursparingar i mätvallarna för genomgående ledningar. Flödet ut från vallarna kommer att mätas manuellt med hink och klocka alternativt elektromagnetiska flödesmätare. Vattnet från en mätvall i en spårtunnel leds till nästa

nedströms liggande mätvall, d.v.s mätningarna görs kumulativt. Under byggsleden fylls grovt material på båda sidor om mätvallen så att byggfordon kan passera.

En del av de mätvallar som använts under byggskedet och ligger i anslutning till tvärtunnlarna kan komma att användas även under drifttiden. Vattnet från dessa planeras ledas i slutna ledningar till en mätbrunn i servicetunneln. I mätbrunnen finns det möjlighet att manuellt mäta flöden i de olika ledningarna. Avloppsledningen från mätbrunnen kan anslutas direkt till en samlingsledning eller via en enhet som innehåller en registrerande flödesmätare.

Sektionsvisa mätningar med hjälp av en låg mätvall

Under avsnittet ovan, ”Mätningar under byggsleden” redovisas en mätanordning som består av en låg mätvall till vilken det kan kopplas en stationär eller en mobil mätare. Denna vall skulle också kunna få vara permanent även för driftfasen, förutsatt att vallen inte är högre än vad som tillåts, se avsnittet 4.2 Inledning.

4.4 Samtidiga mätningar av dag- och dräneringsvatten under driftfasen

4.4.1 Standarmetod

Enligt Tunnel 95 så skall när dräneringsvattnet avses att återinfiltreras eller analyseras med avseende på kemisk sammansättning, två separata avloppssystem anordnas, ett för dräneringsvatten och ett för dagvatten. I övriga fall kan ledningar för dräneringsvatten anslutas till dagvattensystemet. Val av metod för omhändertagande av avloppsvatten skall ske i samråd med kommunal VA-enhet och länsstyrelsens naturvårdsenhet.

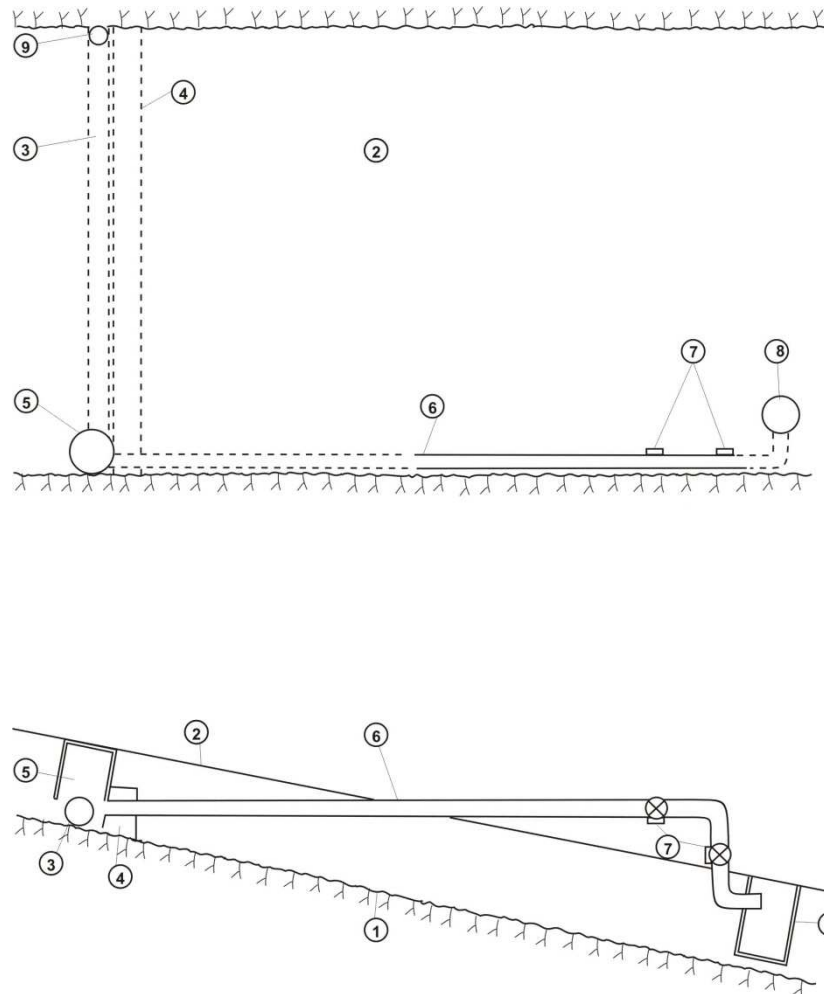
I de tunnlar som byggs i Stockholm i dag så projekteras vanligen separata system. I de tunnlar som har gemensamt dränerings och dagvattensystem så kan dräneringsledningarna anslutas via brunnar till dagvattensystemet. Avståndet mellan brunnarna överskrider vanligen inte 200 m. Vattnet leds till pumpgropar belägna i lågpunkter i tunnlar, varifrån vattnet pumpas vidare upp till markytan. Pumpflödet mäts vanligen med en elektromagnetisk flödesmätare.

4.4.2 Kombinerat dränerings-och dagvattensystem

Förutsättningar:

- Kontinuerliga flödesmätningar inte nödvändiga.
- Summaflödet till tunneln kan beräknas utgående från summan av delflödena från de aktuella tunnelavsnitten.
- Dräneringsvatten skall inte användas för återinfiltration
- Dagvattensystemet är dimensionerat för dräneringsvattnet.

Översiktlig konstruktion se figur 4-6



Figur 4-6. Schematisk skiss över ett förslag till kombinerat dag och dränvattensystem. Överst, sett ovanifrån och nederst sett från sidan.

- | | |
|--------------------------------|--|
| 1. Tunnel eller dikesbotten | 6. Rör från mätvall till dagvattenbrunn. |
| 2. Väg bana | 7. Ventiler och anslutningar för inkoppling av mobila flödesmätare |
| 3. Dräneringsrör längs mätvall | 8. Dagvattenbrunn |
| 4. Mätvall | 9. Spolrör |
| 5. Rensbrunn | |

Varje sektion längs tunneln avgränsas med låga mätvallar. Längs vallen botten monteras en dräneringsslang. På den ena änden av slangen monteras ett spolrör nära tunnelvägg. Vid den andra änden installeras en rensbrunn som är öppen i botten. Från rensbrunnen går ett nästan horisontellt rör igenom mätvallen. Rörets längd styrs av vilken typ av mätare som skall monteras till röret för flödesmätningarna. Exempelvis mätöverfall kräver högre höjd än en elektromagnetisk givare. Oavsett om mätare är anslutna eller ej så avleds vattnet till den närbelägna dagvattenbrunnen som innehåller en slamavskiljare.

Fördelar med en sådant system är att:

- mätningar görs direkt från varje sektion.
- det inte behövs så många mätare och att de mobila mätarna kan vara välskötta och välkalibrerade.
- ledningslängden reduceras lite relativt helt separerat dränerings- och dagvattensystem.

4.5 Kapitel 4, sammanfattning

Som underlag för en sammanställning över befintliga prisvärda och nya mätkonstruktioner har vissa framförda krav i miljö- och arbetshandlingar utnyttjats, liksom synpunkter som framförts på hittills gjorda inläckagemätningar, exempelvis:

- Det tar för lång tid att få igång mätningar
- Mätningar stör arbetet med utbrytningen av tunnlar
- Mätningar är för dyra under både bygg- och driftskeden.
- Mätningar innehåller ofta stora fel.

Inför byggnation av en tunnel är det viktigt att beställare och att de organisationer som skall bygga och driva mätanordningarna är överens om mätstrategier för den aktuella tunneln.

Mätanordningar som skall användas i tunnelavsnitt där de maximala inläckagen är satta så lågt som ca. 1 /min per 100 m tunnelrör bör byggas med omsorg. I avsnittet 2.2.6., diskussioner, ges ett förslag på vad man bör/skall beakta när man utformar en mätvall i ett tunnelavsnitt med så lågt ansatta maximala inläckage.

Nedan presenteras exempel på bra befintliga mätanordningar samt förslag på nya konstruktioner.

Pumpgröpar är beprövade relativt billiga anordningar som använts för att samla upp inläckande vatten. Principerna för att mäta upp det insamlade vattnet har varierat. Några baseras på att pumpgropan har kända förhållanden mellan vattendjup och volym. Sedimentation av slam kan dock ändra dessa förhållanden. I rapporten ges ett förslag på en pumpgrop där effekten av sedimentation minimeras, varvid urpumpad volym ur gropan kan noggrant bestämmas mellan pumpens start- och stoppnivåer.

Beroende på lutningsförhållandena i tunneln så kan uppsamlingsanordningarna som leder vattnet till mätpunkterna utformas på olika sätt. Vid relativt stor sidolutning på tunnelgolvet, så kan kanske ett grundare dike i bergbotten eller en lägre styrvall anläggas. Dessa måste dock skyddas för igensättning av slam. Låga mätvallar skulle kunna användas även vid mätningar under driftskeden.

Vid noggranna sektionsvisa flödesmätningar med låga flöden så bör mätvallar både kontakt- och ridåinjekteras. Vid fastlagda högre maximala inläckageflöden kan kanske ridåinjektering utelämnas. Viss kontroll av läckaget under mätvallen kan göras genom påfyllning av vatten uppströms vallen och okulärbesiktning av eventuellt läckage nerströms vallen.

De mätanordningar som används i anslutning till mätvallar har fungerat bra om skötselinstruktioner följts involverande; montageanvisningar, kontroller, rengöringar

och kalibreringar. De är dock viktigt att mätanordningarna är anpassade för de förväntade flödena och förväntade dämningssgränser uppström mätvallen.

- Vid mätning med hink och klocka så skall mätkärlen ha fastställd mätnoggrannhet eller vara kalibrerade. Klockan bör vara av typ stoppur
- Skiborden på mätöverfall skall ha passande vinkel och nivåmätare ha önskad upplösning och noggrannhet
- Elektromagnetiska mätarena skall ha passande genomflödesdiameter.

I det fall mätaren kräver en stor uppströms fallhöjd och dämningssgränsen är begränsad, så kan ett utloppsörret från mätvallen mynna en bit nerströms mätvallen, så att nödvändig fallhöjd erhålls.

Ambulerande mätare, exempelvis elektromagnetiska eller mätöverfall kan periodiskt anslutas till utloppsledning på mätvallar. Sådana mätare reducerar mätarkostnaderna och underlättar underhåll och kalibreringar. Vidare kan mätare väljas utgående från aktuella flöden.

För att snabbt påbörja inläckagemätningar under byggskedet så kan sk. utspädningsmätningar kunna utnyttjas. Någon typ av spårämne tillsätts kontinuerligt längst upp i tunneln vid mättillfället. Provtagningar görs längs tunneln. Utgående från spädnings av spårämnet mellan provtagningspunkterna så kan inläckaget beräknas. Det bör vara möjligt att urskilja inläckage mellan två mätpunkter ner till ca 2 L/min. Metoden bör testas i fält.

Om sektionsvisa inläckagemätningar skall göras under både bygg- och driftfas så kan kostnaderna hållas nere om samma mätvallar kan användas under båda faserna. För att ta fram sådana konstruktioner så krävs det att riktlinjer tas på fram hur höga mättvallarna kan vara vid olika lutningar på bergbotten och höjder på väggroppar (vägtunnlar) respektive bankroppar (järnvägstunnlar). Mätarna placering en bit nedströms mätvallen anpassas utifrån dämningssgräns och lutningsförhållanden på den aktuella platsen. Detta bör bestämmas i ett tidigt skede så att tekniska lösningar kan tas fram exempelvis för rörgenomföringar igenom mätvallen.

Vid sektionsvisa inläckagemätningar under driftskedet skulle en viss reduktion av ledningskostnaderna kunna ske om utlopps ledningen från en mätvall kunde anslutas till en nerströms liggande dagvattenbrunn. Mätningarna på utloppsledningen skulle kunna göras med en fast eller ambulerande mätare. Denna mätprincip förutsätter dock att det inläckande vattnet inte skall användas för återinfiltration och att dagvattensystemet är dimensionerat även för infiltrationsvattnet.

5 Referenser

- Walkowiak D K, 2006. ISCO Open Channel Flow Measurement Handbook. Miljöbalk (1998:808)
- Lag (2006:412) om allmänna vattentjänster. (Trädde i kraft 2007 och reviderad 2009).
- Astner H, Evred J, 2002. Länsstyrelsernas process för beslutet om betydande miljöpåverkan- pilotstudie av fyra länsstyrelser.
- Eriksson M. Naturvårdsverket. 2009. Handbok med allmänna råd om miljöprovning av planer och program. Handbok 2009:1. Utgåva 1. Februari 2009.
- Franzén T; Myran T, Larsson O, Rustan A, 1983. Stiftelsen Bergteknisk forskning. Ventilation vid underjordsarbete.
- Goodman R.E., Moye D., Schalkwyk A. and Javandel I. (1965). Groundwater inflows during tunnel driving. Geol. Soc. America Publication – Engineering Geology, Vol. 2, pp. 39-56.
- Myrabø, S. (2008) Romeriksporten – Setningsutvikling ved utbygging og situasjonen i dag. Konferansepublikasjon på Nordisk Geoteknikermøte nr. 15 3.-6. september 2008.
- Myrabø S; 2005. Miljøovervåkning og tiltak i Østmarka 1994-2004. Konesjonsrapport for NVE, 2005. Utgitt i Jernverket region Øst.
- Myrabø S; 2002. Hydrogeologisk overvåkning i Romeriksporten og nærmiljø. Automatisk og manuell . Järnbaneverket Region Øst.
- Tunnel 2004. Vägverkets allmänna tekniska beskrivning för nybyggande och förbättring av tunnlar. Vägverkets publikation 2004:124.
- BV Tunnel. 2005. Standard 585.40. Banverket.
- Meteorologi-Terminologi.1994. SS020106. STS, Svensk standard.

Bilaga A. Fuktvandring via ventilationssystem

A.1. Fuktvandring via ventilationssystem

Det är sedan tidigare känt från tunnlar, jordkällare och krypgrunder att dessa blir fuktiga under sommaren när varm och fuktig uteluft tränger in och kyls ner.

Nedan har gjorts några enkla skattningar över vattentransporter via ventilationssystem till och från tunnlar. Vid skattningarna har antagits att temperaturer, avdunstning och kondensation är lika längs hela tunnelsträckningen och de är delvis baserade på konstanta parametervärden. Resultaten skall därför ses som en indikation på storleken av flöden.

För att undersöka hur stor inverkan ventilationen har på tunnelklimatet, så har beräkningar gjorts på fyra fiktiva vägtunnlar, vardera 1 km, på olika platser i Sverige.

De valda platserna är Jokkmokk och Jönköping (inlandsklimat) samt Skellefteå och Göteborg (kustklimat). Skattningar har gjorts vid två tidpunkter på året, januari och juli.

A 1.1 Beräkningsunderlag

De data som behövs för att skatta fukttransport via luftflöden är:

- Temperaturer på inkommande luft och på luft i tunnlar
- Daggpunktstemperaturer på ingående luft och fuktförhållanden i tunneln
- Ventilationsflöden under bygg- och driftskede

Daggpunkten definieras som den temperatur då kondens bildas i luften, d.v.s. när den relativa luftfuktigheten är 100 %. För att beräkna den absoluta mängden vatten i luften vid givna temperaturer utgår man ifrån den ideala gaslagen (formel A1-1) och uträkningen för vattnets mättnadsångtryck (formel A1-2).

$$D = \frac{P}{T * R} \quad (\text{A.1-1})$$

$$E = 6,1078 * 10^{\left(\frac{7,5 * DTD}{237,7 + DTD}\right)} \quad (\text{A.1-2})$$

Där D är gasens densitet (kg/m³)

P är gasen tryck (Pa)

R är gaskonstanten för luft

T är luftens temperatur (°K), där beräkningar gjorts med 100% RF (relativ fuktighet) är T = DTD

DTD är daggpunktstemperaturen (°C)

E är mättnadsångtrycket (hPa)

Genom att ersätta gstrycket med mättnadsångstrycket och luftens gaskonstant R med vattenångans motsvarighet R_w kan (A1-1) ersättas med:

$$D = \frac{E * 100}{(DTD + 273,15) * R_w} \quad (A1-3)$$

Där R_w är gaskonstanten för vattenånga = 461,5 J/kg, °K

Med vattnets densitet satt till 1000 kg/m³ kan volymen vatten beräknas.

Temperaturer

Utetemperaturer: Data hämtade från SMHI's databas*

Tunneltemperaturer: Sommartid. Antagande: Utetemperatur minskad med 10 °C

Vintertid. Antagande: Utetemperatur ökad med 10 °C

Fukttinnehåll i luft

Dagpunktmätningar uteluft: Data hämtade från SMHI's databas*

*Utetemperaturer och dagpunktstemperaturer för de olika orterna är hämtade från SMHI:s databas för åren 2004-2008 (Jokkmokk och Skellefteå) samt 1991-1995 (Jönköping och Göteborg). Temperaturerna presenteras i Tabell 2-1.

Fuktförhållande tunnelluft: Sommartid. Antagande: Relativ fuktighet 100 %. All kondenserad fukt avsätts i tunneln.

Vintertid. Antagande: Relativ fuktighet 100 %. Luften har blivit mättad av den fukt som kan finnas på väggar och golv**.

** Antagandet stämmer troligen ej för en stor del av tunnlarna.

Ventilationsflöden

Ventilationsflöden: Byggskede. Hämtad från litteratur.***

Driftskede. Hämtad från Tingstadstunneln ****

***Luftflödena i byggskede är hämtade från beräkningsmodeller där dieseldriven utlastning är dimensionerande för ventilationen enligt "Ventilation vid underjordsarbeten" (Franzén 1983). Om en hjullastare och två lastbilar används samtidigt för utlastningen av berg i en tunnel så har nödvändigt luftflöde skattats till ca 50 m³/s..

**** Under driftskedet är flödet vanligen betydligt större, då bilarna som färdas genom tunneln ökar vindhastigheten och därmed ventilationen. Ett exempel är från Tingsstadstunneln i Göteborg där vindhastigheten kan vara ca. 7 m/s i en 70 m² stor tunnel med enkelriktad trafik. Detta ger ett flöde på 490 m³/s, men då lägre flöden också finns för liknande motorvägstunnlar med enkelriktad trafik har ett typflöde satts till 400 m³/s. Vid dubbelriktad trafik är flödena mycket mindre.

Tabell A.1-1 – Snittemperaturer (DTT), dagpunkter (DTD) och beräknad absolut fuktighet för juli och januari

Januari			Absolut fukt (kg/m ³)	
Område	DTD (°C)	DTT (°C)	DTD	DTT+10
Jokkmokk	-8	-7	0,00274	0,00595
Skellefteå	-3	-1	0,00393	0,00881
Jönköping	0	0	0,00485	0,00939
Göteborg	0	2,5	0,00485	0,01099
Juli				
Område	DTD (°C)	DTT (°C)	DTD	DTT-10
Jokkmokk	8,5	15	0,00853	0,00679
Skellefteå	9	15	0,00881	0,00679
Jönköping	10,5	17,5	0,00969	0,00800
Göteborg	11	18	0,01000	0,00826

Skattningar av fuktvandringar har gjorts enligt följande:

$$X(\text{januari}) = X(DTD_{\text{tunnel}}) - X(DTD_{\text{ute}}) = X(DTT_{\text{ute}} + 10) - X(DTD_{\text{ute}}) \quad (\text{A1.-4})$$

$$X(\text{juli}) = X(DTD_{\text{ute}}) - X(DTD_{\text{tunnel}}) = X(DTD_{\text{ute}}) - X(DTT_{\text{ute}} - 10^{\circ}\text{C}) \quad (\text{A1.-5})$$

Där X är vatteninnehåll för 1 m³ luft (l/m³)

A.1.2. Resultat

Den beräknade vattentransporten (kondensering) in till en tunnel under juli respektive vattentransporten (avdunstning) ut ur en tunnel under december presenteras i Tabell A.1-2, för både bygg och driftskeden.

Tabell A.1-2. Vattentransport vid angivna luftflöden och tunnelareor för bygg- och driftskede.

Område	Januari			Juli		
	X ¹ (l/m ³)	Byggskede (l/ min per 100m,)	Driftskede (l/ min per 100m,)	X ² (l/m ³)	Byggskede (l/ min per 100m,)	Driftskede (l/ min per 100m,)
Luftflöde (m ³ /s)		50	400		50	400
Jokkmokk	0,0032	1,0	7,7	0,0017	0,5	4,2
Skellefteå	0,0049	1,5	11,7	0,0020	0,6	4,8
Jönköping	0,0045	1,4	10,9	0,0017	0,5	4,1
Göteborg	0,0061	1,8	14,7	0,0017	0,5	4,2

¹ Vattenvolym per m³ ventilationsluft som avdunstar i tunneln

² Vattenvolym per m³ ventilationsluft som kondenserar i tunneln

Resultaten från utförda skattningar av vattenflöden via ventilationssystem visar inga större skillnader sommartid mellan orter med varierande uteluftstemperaturer och luftfuktighet. Vintertid så är skillnaderna större.

Driftskedet , sommartid

Under driftskedet sommartid kan ett icke oansenligt vattenflöde på upp till ca 4 L/ min per 100m komma in till tunnlar via ventilationen. Om tunnlar har separata system för dag- och dräneringsvatten så kommer troligen det mesta av det kondenserade vattnet att rinna till dagvattensystemet. Det som kan komma till dräneringssystemet torde motsvara ett flöde som är under 0,5 L/ min per 100m.

Byggskedet, sommartid

Under byggskedet sommartid så är vattenflödet via ventilationssystemet mycket mindre än under driftskedet, kanske upp till ca. 0,5 L/ min per 100m,. Detta vatten går dock till dräneringssystemet och kan påverka mätningarna vid låga dräneringsflöden.

Driftskedet vintertid

Under driftskedet vintertid så kan vattentransporten via ventilationen ut ur tunneln motsvara ett flöde på upp till ca 11 L/ min per 100m. Detta är ett maximalt värde som förutsätter att det hela tiden finns tillgängligt vatten i tunneln som kan avdunsta, så att relativa fuktigheten blir 100 % på den utgående luften. Detta är inte troligt, men om så skulle vara fallet så kommer troligen det mesta av vattnet från vägbanan, och har transporterats dit i form av snö och is. Små mängder kan visserligen avdunsta ifrån tak och väggar involverande dräner. Oavsett vilka förhållanden som råder så är det svårt att

bedöma andelen inläckande vatten som lämnar tunneln via ventilation. Kanske kan det motsvara upp till ca. 0,5 L/ min per 100m.

Byggskedet, vintertid

Under byggskedet vintertid kan fukten som förs ut med ventilationen dels utgöras av det processvatten som används vid borring och spolning, dels av inläckande vatten till tunneln. Det utventilerade vattnet kan motsvara ett flöde upp till ca 1,5 L/ min per 100m, om tillräckligt med vatten finns tillgängligt för avdunstning. Det är svårt att skatta hur stor andel av detta vatten som utgör inläckage till tunnel. Kanske kan ett flöde på upp till ca. 0.5 L/ min per 100m utgöras av vatten från inläckage.

Slutsats

De mycket översiktliga skattningar som gjorts över fukttransporter via ventilationssystem visar att dessa kan få en viss betydelse om läckagekriterierna är så lågt satta som 1-2 L/ min per 100m.

Vintertid blir de uppmätta inläckande flödena för låga och sommartid för höga. Påverkan av ventilationen kan motsvara upp till åtminstone +/- 0.5 L/ min per 100m.

Bilaga B Läckage i och under mätvallar

B.1. Läckage i och under mätvallar

Mätvallarnas konstruktion kan variera beroende på förutsättningarna i den aktuella tunneln. Om tunnelbotten lutar mycket i sidled så kan en stor del av mätvallen endast utgöra en styranordning för vatten mot en mätare. Uppströms denna typ av vall bildas endast ett litet eller inget vattenmagasin. Vid andra förutsättningar är vallen konstruerad för att åstadkomma önskad nivåskillnad mellan vattenytorna uppströms och nedströms mätvallen för att möjliggöra installation av en mätanordning.

Vid flödesmätning i anslutning till en mätvall finns en rad olika faktorer som påverkar osäkerheten i mätningarna. Oavsett mätmetod (hink och klocka, överfall med nivåmätning, induktiv flödesmätare o.s.v.) är metoden behäftad med mätfel. Ett systematiskt fel vars storlek är mycket svår att skatta är läckaget under mätvallen.

Infiltration i berget under vattenmagasinet uppströms mätvallen, dvs. läckage under vallen, drivs av det hydrostatiska tryck vars storlek är en funktion av magasinets djup. Läckagets storlek beror givetvis även av tunnelbottnens hydrauliska konduktivitet (genomsläppighet). Den störda zonen närmast tunneln, som påverkats av sprängningen, kan antas ha en högre konduktivitet än omgivande berg. Den störda zonen kan också vara anisotrop med avseende på hydraulisk konduktivitet. Exempelvis kan en högre konduktivitet längs med tunneln än radiellt ut från tunneln i den störda zonen inte uteslutas. För tunnlar belägna under grundvattenytan beror mängden vatten som infiltrerar under magasinet även av storleken av den tryckgradient in mot tunneln som driver inläckaget.

För att åskådliggöra potentiellt läckage och skatta storleksordningen på förhållandet mellan läckage under mätvall och uppmätt flöde samt att ge en bild av hur strömning under mätvallen kan se ut vid olika förutsättningar, har ett antal olika scenarion simulerats med en numerisk modell.

B.1.1. Modelluppbyggnad

Simulering har genomförts med hjälp av programvaran Modflow .

Konceptuell modell

I skalan för den aktuella problemställningen styrs flöden och tryckförhållanden i berget av det lokala sprickmönstret och det lokala spricksystemets koppling till det omgivande berget. Berget är av naturen heterogent och det är därför en stark förenkling att ersätta spricksystemet med ett homogent och isotropt kontinuum. I ett verkligt fall styrs storleken av ett eventuellt läckage under en mätvall av förekomsten av sprickor då den hydrauliska konduktiviteten i bergmassan är mycket låg. Storleken av ett läckage i en spricka under en mätvall motsvaras dock av en konduktivitet för ett homogent och isotropt kontinuum av en viss genomströmningsarea. Responsen vid variationer i parametrar som påverkar tryckförhållandena kan antas vara relativt likartade för fallet med strömning i spricka som i fallet med ett homogent isotropt kontinuum under förutsättning att det lokala spricksystemet är kopplat till omgivande berg. Då syftet är att kvalitativt åskådliggöra vilka effekter variation i olika parametrar ger, ses ett

ersättande av spricksystemet med ett homogent och isotropt kontinuum som en rimlig förenkling i denna översiktliga modellstudie.

Flödet har simulerats i två dimensioner genom ett 200 meter långt tvärsnitt längs med en tunnel med en enhetsbredd. Mätvallen placeras långt ifrån modellens sidoränder (dvs. nära mitten) för att inte påverkas av eventuella randeffekter. Då syftet inte är att skatta totalt inläckage till tunneln utgörs modellens övre gräns av tunnelbotten. Modellens utsträckning i vertikalled är 20 m.

I teorin får man, i det närmaste, ett radiellt flöde in mot en tunnel. Med anledning av denna studies syfte och ramar hålls dock modellgeometrin enkel. Den tvådimensionella modellen tar inte hänsyn till radiellt flöde in mot tunneln. Denna förenkling gör att beräknat totalt inläckage till tunneln troligen överskattas.

Modellen beskriver berget som en sluten akvifär och stationärt flöde simuleras. För att skapa en fördelning av head (tryckhöjd) som driver flödet sätts randvillkor på övre och nedre randen, se Figur B1-1.

Antaganden

Vid drivning av en tunnel uppkommer en s.k. störd zon i anslutning till tunneln där berget är påverkat av sprängningen. Den störda zonen är mer uppsprucken och har en högre konduktivitet än omkringliggande berg. Som anges i Tabell B1-1 så har den zon vars hydrauliska egenskaper kraftigt förändrats vid tunneldrivningen antagits vara 0,6 m från tunnelgolv.

Vid utvärdering av det simulerade läckagets storlek relativt totalt inläckage antas inflödet till tunneln vara lika för hela tunnelarean. Dvs. det inflöden som erhålls vid simulering av en enhetsbredd extrapoleras till att gälla hela tunnelarean och ingen kompensation för radiellt flöde in mot tunneln har gjorts.

I denna studie har en bergtäckning av något tiotal meter antagits i parameteruppsättningen för referenssimulering vid ansättandet av trycket som driver flödet in mot tunneln. Då syftet med studien inte är att kvantifiera totalt inläckage till tunneln har ingen hänsyn tagits till skillnad i läge för tunnelns tak (lägre yttre hydrostatiskt tryck) vid skattningar av inläckage till tunneln.

Modellen tar inte hänsyn till eventuellt läckage i kontaktytan mellan mätvall och tunnelbotten. Detta läckage kan minimeras med åtgärder som kontaktinjektering och val av plats för mätvall (sprickfattig tunnelbotten).

Diskretisering

Modellens grundläggande uppbyggnad utgörs av celler med storlek 0,2*0,2 m. Förtätning av beräkningsgriden i både x- och y-led har genomförts i anslutning till magasinet. Modellen utgörs av 1051 beräkningsceller i x-led (längs tunneln) och 119 celler i y-led (från tunnelbotten och nedåt).

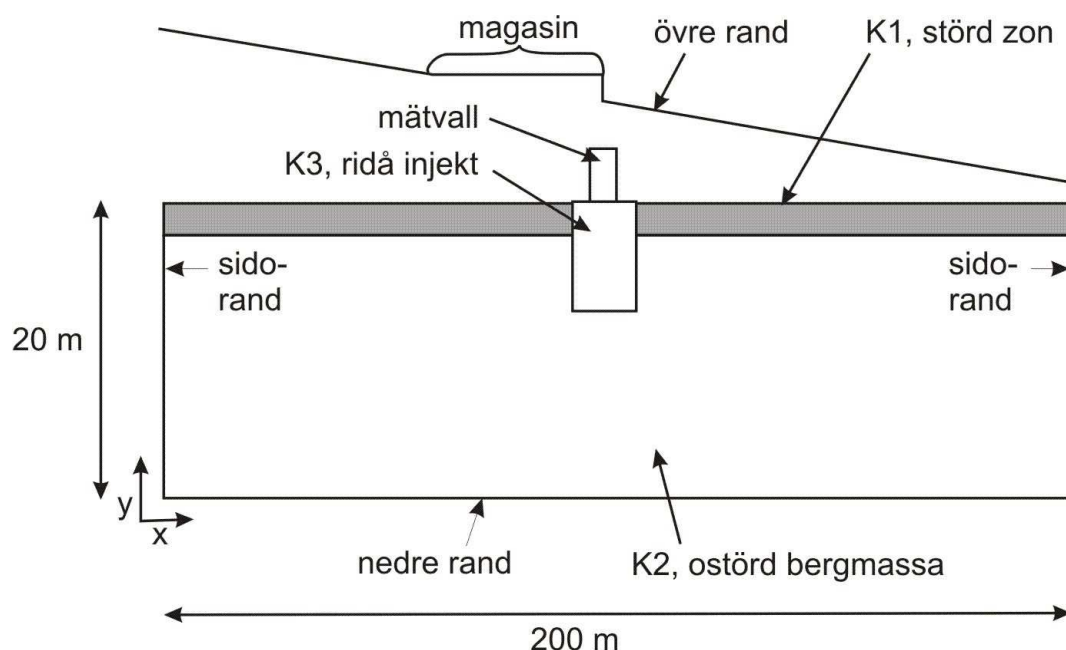
Randvillkor

Konstant tryck är ansatt på den nedre randen för att simulera den tryckgradient som driver inläckaget till tunneln och påverkar flödesmönstret under magasinet. På den övre randen ansätts ett konstant tryck vilket minskar linjärt med tunnellutningen. Minskningens storlek bestäms av tunnelbottens lutning och motsvarar höjdförlusten

längs med tunnelns botten för att simulera en minskad totalpotential. I kombination med det ansatta konstanta trycket på den nedre randen och modellens utsträckning i vertikalled innebär det att gradienten in mot tunneln ökar med ökat djup. Detta ger två fördelar; dels motsvarar det bättre de faktiska förhållandena med ökad gradient in mot tunnel på större djup (övriga parametrar konstanta) samt att det vid magasinets början uppströms ej induceras en strömning åt vänster i modellen. Randvillkoret vid magasinet utgörs av ett konstant tryck vars storlek och utbredning bestäms av tunnellutning och ansatt magasin djup vid mätvallen. Ansatta tryck på övre och nedre randen redovisas i Tabell B1-1.

Mätvallen simuleras av en sträcka på den övre randen över vilken inget flöde förekommer.

Storleken på de konstanta tryck som ansätts på övre och nedre randen och driver inflödet till tunneln är givetvis en källa till osäkerhet. Beroende på avståndet till grundvattenytan från den aktuella tunneln dvs. övertäckningen, ser tryckförhållandena i berget drastiskt olika ut. Numeriskt beräknat totalt inflöde per 100 m tunnel med parametrar enligt Tabell B1-1 ger dock ett beräknat inflöde i samma storleksordning som med en analytisk beräkning (Goodman m.fl. 1965). Sidoränderna utgörs av slutna celler dvs. inget flöde förekommer över dessa.



Figur B1-1. Schematisk skiss över modellens utbredning samt randvillkor, zoner med K-värden och ridåinjekterad zon.

B.1.2. Modellkörningar

För att belysa olika faktorerers påverkan på flödesförhållandena i anslutning till en mätvall har ett antal parametrar som kan antas vara kopplade till flödesmönstret under mätvallen varierats. De parametrar som varierats är:

- Mätvallens tjocklek
- Hydraulisk konduktivitet i bergmassa och störd zon
- Effekt av ridåinjektering
- Vattennivå i vattenmagasinet uppströms mätvall
- Gradient in mot tunnel

I Tabell B1-1 nedan redovisas den parameteruppsättning som används för en referenssimulering utifrån vilken variationer i parametrar görs. Vid redovisning av resultat för variationer i parametrar redovisas endast de parametrar som avviker från Tabell B1-1.

Tabell B1-1. Parameteruppsättning för referenssimulering

Parameter	Värde	Enhet
Konduktivitet i ostört berg	$1,0 \cdot 10^{-8}$	m/s
Konduktivitet i störd zon	$1,0 \cdot 10^{-6}$	m/s
Tjocklek mätvall	0,3	M
Tunnellutning	1,5	%, m/100m
Magasinet djup vid mätvall	0,5	m
Injektering	nej	-
Djup störd zon	0,6	m
Tryck övre rand x=0	20	m
Tryck övre rand x=200	17	m
Tryck nedre rand	40	m

B.1.3. Resultat

Resultat från genomförda simuleringar, med variation av parametrar som presenterats i avsnitt B1.1 ovan, redovisas under respektive nedanstående rubrik.

Terminologi

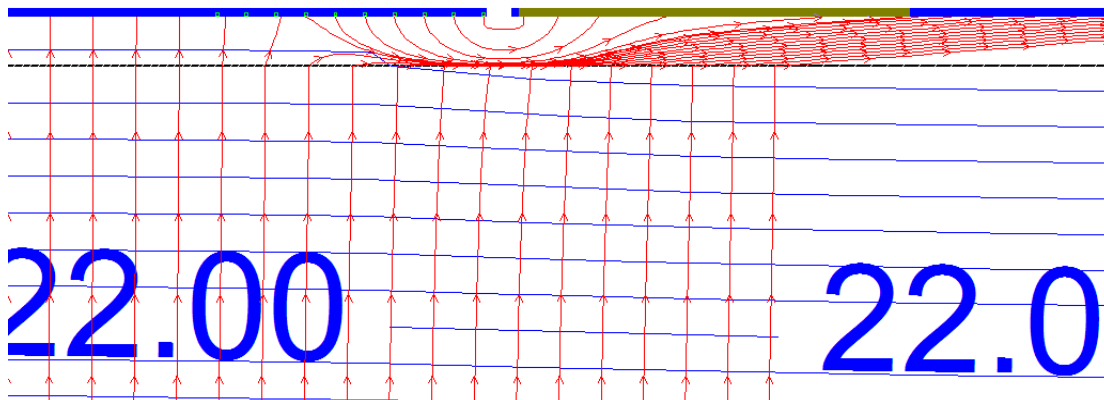
För att beskriva flödesmönstret under mätvallen i tabellform och i figurer används en rad olika termer och begrepp som definieras enligt följande.

Utströmningsområde läckage. Detta avser den sträcka nedströms mätvallen där vatten som infiltrerat under magasinet åter når tunnelbotten. I B1-1 är utströmningsområde läckage markerat med grönt.

Isopotentiallinje. Linje som sammanbinder punkter med samma tryck och mot vilka flödet är ortogonalt vid de isotropa förhållanden som förutsatts. Det beräknade potentialfältet som respektive modellkörning resulterar i åskådliggörs med hjälp av isopotentiallinjer. Isopotentiallinjer ses i Figur B1-2 markerade med blått. De numeriska värdena i figurerna representerar tryckhöjd för bruten isopotentiallinje.

Strömlinje. I figurer åskådliggörs flödesmönstret av strömlinjer. En strömlinje är en kurva till vilken hastighetsvektorn är tangent i varje punkt dvs. den bana en injicerad

partikel skulle följa vid beräknat tryckförhållande. I **Figur** Figur B1-2 är Strömlinjerna rödfärgade med pilar som anger strömningsriktningen.



Figur B1-2. "Utströmningsområde läckage" definieras som den sträcka på nedströmssidan av mätvallen där det inläckande vattnet till tunneln härrör från magasinet. "Utströmningsområde läckage" är grönmärkat i figuren.

Läckage per breddmeter tunnel. Denna siffra redovisas i resultattabellerna och beskriver det totala simulerade flödet på sträckan som definieras som "Utströmningsområde läckage". Då modellen utgörs av ett snitt längs tunneln med en tjocklek av en enhetsbredd i z-led, dvs. tvärs tunneln, skall denna siffra multipliceras med tunnelns bredd för att ge en fingervisning av det totala läckaget under mätvallen. En siffra på totalt beräknat läckage presenteras ej då simuleringarna inte gör anspråk på att uppskatta absolutflöden utan att ge en uppfattning om storleksordningar och hur förändringar av läckage är kopplat till respektive parameter.

Beräknad andel läckage under mätvall per 100 m. I resultattabellerna presenteras en uppskattning av hur stor andel av det totala beräknade flödet som utgör läckage under mätvallen. Beräkningen skall ses som en grov skattning och baseras på beräkning av totalt läckage under mätvall i en tunnel dividerat med beräknat totalt inläckage till samma tunnel på en 100 m lång sträcka.

Beräknat läckage relativt 1 L/min/100 m. Beräknat totalt läckage under en mätvall relativt ett ansatt inläckage till tunneln på 1 L/min per 100 m. Detta beräknas genom att simulerade "Läckage per breddmeter tunnel" (se definition ovan), multipliceras med en ansatt tunnelbredd av 10 m och relateras till ett lågt tillåtet inläckage på maximalt 1 L/min per 100 m tunnel. Observera att denna beräkning gäller i de fall mätvallarnas inbördes avstånd är 100 m. Denna jämförelse mot ett ansatt värde av 1 L/min per 100 m har störst relevans för de simuleringar där bergets konduktivitet är $1 \cdot 10^{-8}$ m/s, dvs. då det ansatta maximala läckaget är ungefär lika med det beräknade.

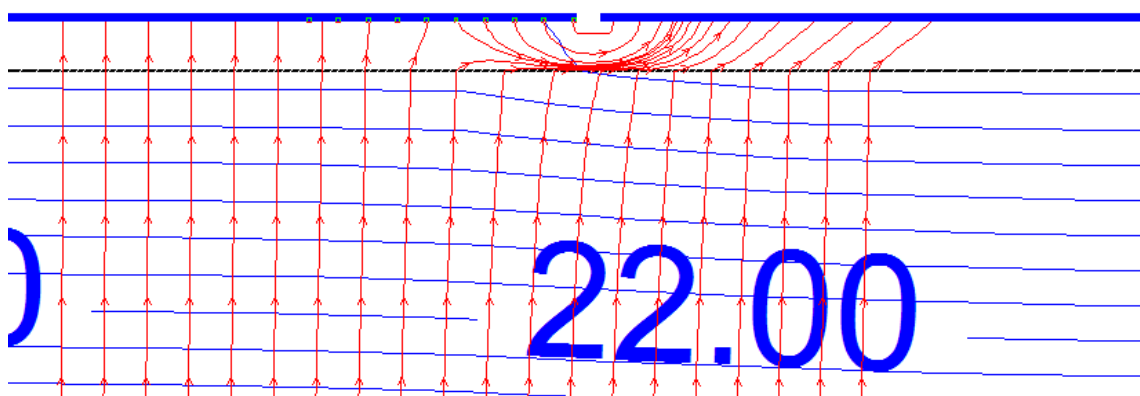
Variation i mätvallens tjocklek

Om mätvallens tjocklek ökas betyder det att vi får en minskad gradient från magasinet till nedsidan av vallen beroende på det längre avståndet. Detta påverkar både mängden infiltrerat vatten i botten på vattenmagasinet och flödesmönstret. I Tabell B1-2 redovisas ansatta parametrar för mätvallens tjocklek samt resultat från simuleringar.

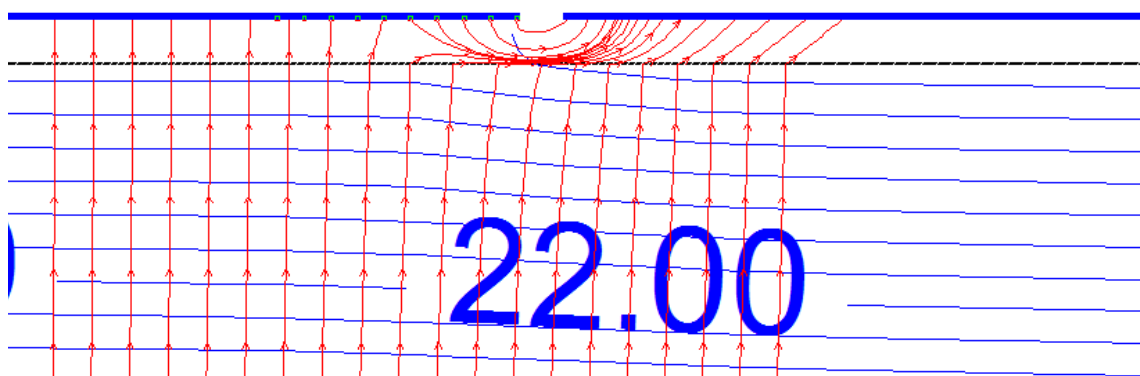
Flödesmönstrets förändring under mätvallen presenteras i Figur B1-2 till Figur B1-7, avstånd mellan blå isopotentiallinjer är 0,5 m vattenperlare.

Tabell B1-2. Förändring i läckage under mätvall vid variation i mätvallens tjocklek

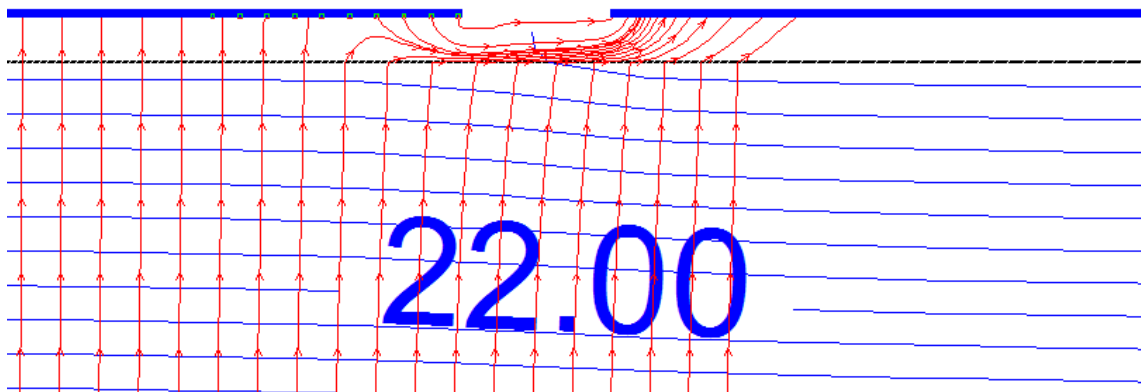
Tjocklek mätvall (m)	Utströmningsområde läckage (m)	Läckage per breddmeter tunnel (L/min)	Relativ minskning med ökad tjocklek mätvall (%)	Beräknad andel läckage under mätvall per 100 m tunnel (%)	Beräknat läckage relativt 1 L/min/100 m tunnel (%)
0.3	1	0.0124	100	5.3	12.4
0.6	0.8	0.0109	88	4.6	10.9
2.0	0.4	0.0050	40	2.1	5.0



Figur B1-5. Flödesmönster vid mätvallstjocklek 0,3 m.



Figur B1-6. Flödesmönster vid mätvallstjocklek 0,6 m.



Figur B1-7. Flödesmönster vid mätvallstjocklek 2,0 m.

Resultaten visar att läckaget minskar med en faktor 2,5 vid en ökning av mätvallens tjocklek från 0,3 till 2,0 m. En praktiskt rimlig ökning av mätvallens tjocklek från 0,3 m till 0,6 m ger en minskning av läckaget under mätvallen på ca 12 %.

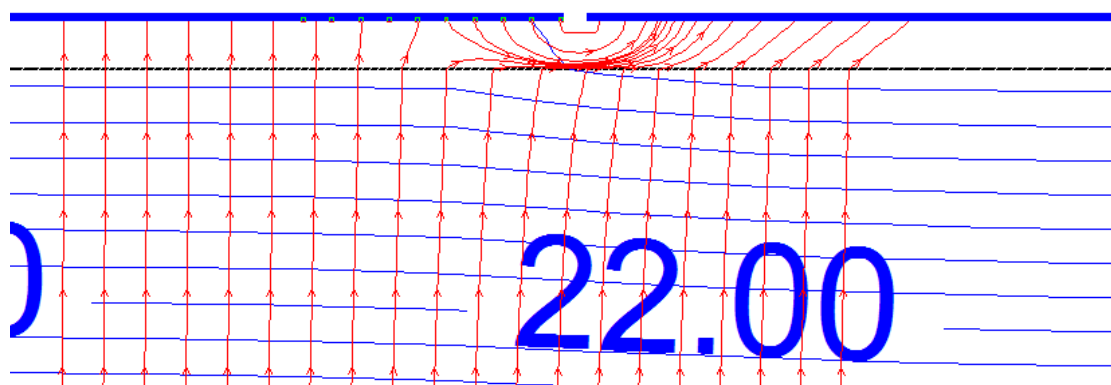
Variation av hydraulisk konduktivitet i bergmassa och störd zon

Läckagets storlek och flödesmönstret under mätvallen ändras givetvis med konduktiviteten i den störda zonen men påverkas även starkt av konduktiviteten i övriga berget. Flödesmönster och läckage under mätvallen påverkas inte bara av konduktivitetens absolutvärde i den störda zonen respektive övriga berget utan även relationen mellan dessa. För att åskådliggöra detta har konduktivitet i bergmassan, K1, och i den störda zonen, K2, varierats för att ge ett antal representativa parameteruppsättningar. I Tabell B1-3 redovisas ansatta parametrar för K1 och K2 samt resultat från simuleringar. Visualisering av resultaten för valda realiseringar presenteras i Figur B1-8 till B1-18, avstånd mellan blå isopotentiallinjer är 0,5 m vattenpelare.

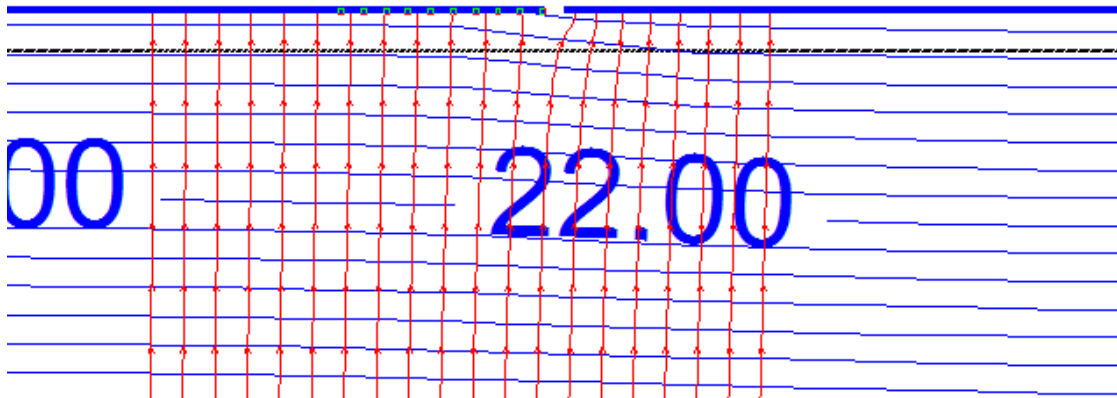
Tabell B1-3. Förändring i läckage under mätvall vid variation av konduktivitet i berg och störd zon

Modell- körning nr	Konduktivitet berg, K1 (m/s)	Konduktivitet störd zon, K2 (m/s)	Utströmningso- mråde läckage (m)	Läckage per breddmeter tunnel (L/min)	Beräknad andel läckage under mätvall per 100 m tunnel (%)	Beräknat läckage relativt 1 L/min per 100 m tunnel (%)
1	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	4.90	0.1301	52.5	130
2	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	1.00	0.0124	5.3	12
3	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	0.00	0.0000	0.0	0.0
4	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-8}$	0.00	0.0000	0.0	0.0
5	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$	0.45	0.0018	0.8	1.8
6	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$3,0 \cdot 10^{-7}$	0.50	0.0028	1.2	2.8
7	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	0.70	0.0054	2.3	5.
8	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	0.30	0.0070	0.3	7.0*
9	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	1.00	0.1202	5.1	120*
10	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	0.00	0.0000	0.00	0*

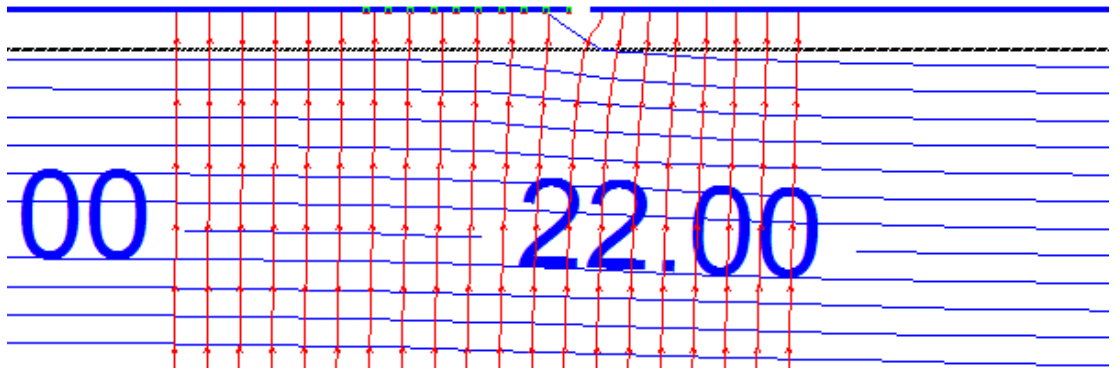
* Det simulerade inläckaget till tunnelavsnittet avviker från det ansatta värdet på 1L/min per 100 m tunnel.



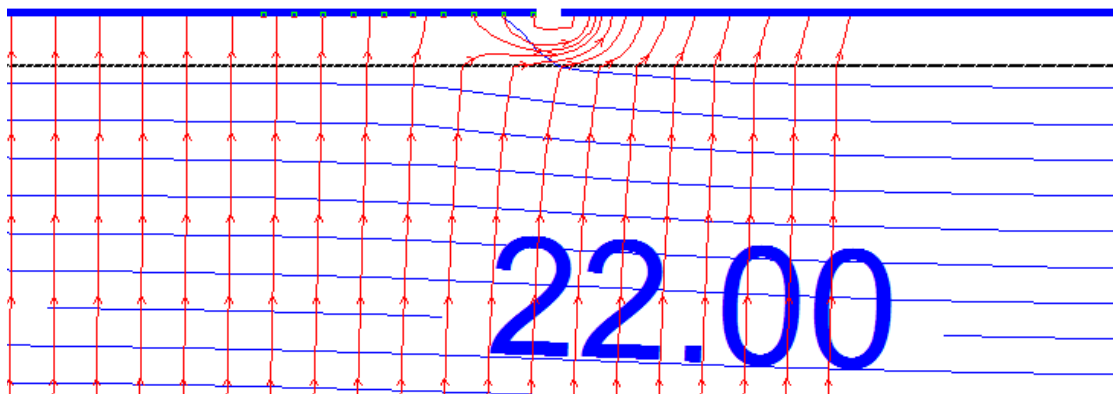
Figur B1-8. Flödesmönster för referenssimulering med $K1=1,0 \cdot 10^{-8}$ m/s och $K2=1,0 \cdot 10^{-6}$ m/s.



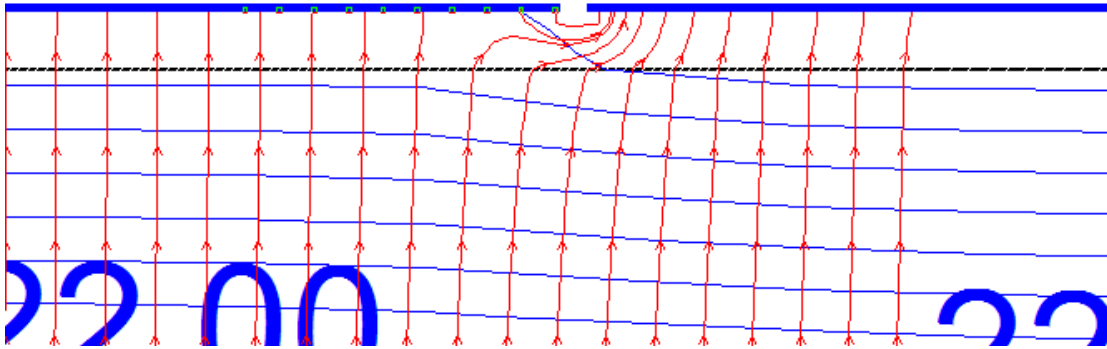
Figur B1-9. Flödesmönster utan störd zon för $K1=K2=1,0 \cdot 10^{-8}$ m/s.



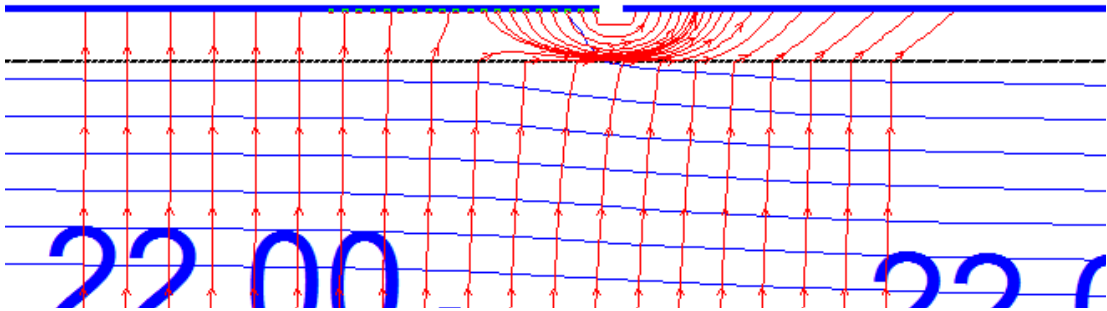
Figur B1-10. Simulering med $K1=1,0 \cdot 10^{-8}$ m/s och $K2=1,0 \cdot 10^{-7}$ m/s ger ett uppåtriktat flöde under magasinet dvs. inget vatten läcker under mätvallen.



Figur B1-11. Simulering med $K1=1,0 \cdot 10^{-8}$ m/s och $K2=2,0 \cdot 10^{-7}$ m/s ger ett utströmningsområde för läckage under mätvallen av ca 0,45 m.



Figur B1-12. Simulering med $K1=1,0\cdot 10^{-7}$ m/s och $K2=1,0\cdot 10^{-6}$ m/s ger ett utströmningsområde på endast ca 0,3 m nedströms mätvallen.



Figur B1-13. Simulering med $K1=1,0\cdot 10^{-7}$ m/s och $K2=1,0\cdot 10^{-5}$ m/s.

Resultaten belyser vikten av förhållandet mellan konduktiviteten i störda zonen och övriga berget. Detta beror på det drivande tryckfallets fördelning i de två enheterna in mot tunneln. Vid en låg konduktivitet i berget relativt den störda zonen kommer en mycket stor del av tryckfallet in mot tunneln att ligga över det tätare berget vilket medför ett större läckage under mätvallen, övriga förutsättningar lika.

Om konduktiviteten i störda zonen sätts lika konduktiviteten i det ostörda berget erhålls ett jämnt fördelat tryckfall in mot tunneln. Detta medför att om en mätvall står på en tunnelbotten med en konduktivitet på $2,0\cdot 10^{-7}$ m/s kan ett läckage erhållas (se modellkörning 5) samtidigt som en nästan tio gånger mer genomsläppig tunnelbotten inte har något läckage under mätvallen, beroende på konduktiviteten i det övriga berget (se körning 10). Liknande fenomen erhålls om bergets konduktivitet ökas med en tiopotens (se modellkörningarna 2 och 8). Då halveras nästan läckaget under mätvallen.

Med ett vattenmagasin med ett djup av 0,5 m och stora skillnader i hydraulisk konduktivitet mellan berg ($1,0\cdot 10^{-8}$ m/s) och störd zon ($1,0\cdot 10^{-5}$ m/s) så blir felet orsakat av läckage under mätvallen ca 130 % om jämförelse görs mot ett ansatt maximalt inflöde till tunneln på 1 L/min per 100m. Om jämförelsen istället görs mot faktiskt beräknat inläckage till tunneln utgör läckaget ca 50 %.

Det behövs dock en skillnad på två tiopotenser i hydraulisk konduktivitet mellan berg och störd zon för att få ett läckage under mätvallen som är större än 5 % av totalt uppmätt flöde om mätvallarna står med 100 meters mellanrum.

Effekt av injektering

En ridåinjektering har simulerats genom att ett lågt K-värde, K3, har ansatts i en zon i anslutning till mätvallen, se Figur B1-1. Zonens utbredning, dvs. injekterings antagna inträngningslängd och djup, är 1,5 m i x-led och 2 m i y-led. Den injekterade zonen simuleras med ett K-värde av $1,0 \cdot 10^{-9}$ m/s. Varierade parametrar och resultat redovisas i Tabell B1-4. Resultaterande strömningsmönster ses i Figur B1-14 och Figur B1-15, avstånd mellan blå isopotentiallinjer är 0,5 m vattenpelare.

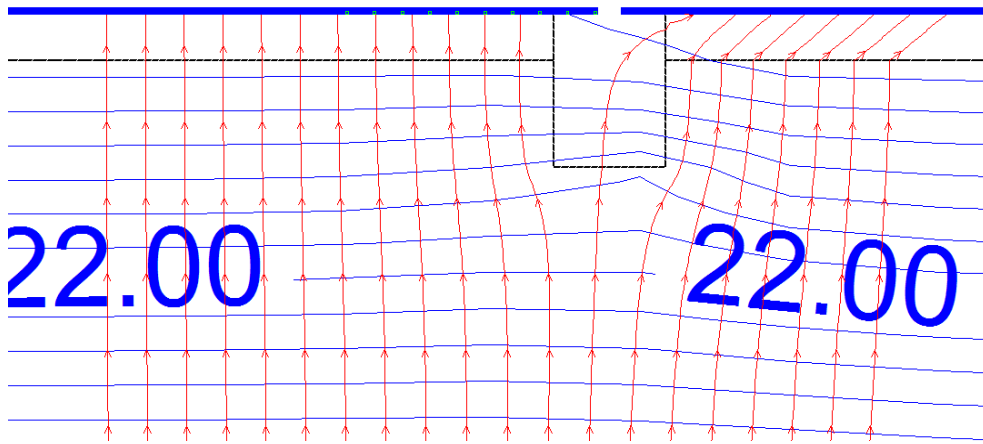
Genom att ansätta ett konstant tryck på nedre randen mycket nära randvillkoret på den övre randen undersöktes hur liten gradient in mot tunneln som krävs, för att en infiltration under vattenmagasinet uppströms mätvallen skall kunna ske under en mätvall med ridåinjektering. Randvillkoret för nedre randen sattes lika den övre randen plus 1 meters tryckhöjd för att skapa en liten gradient in mot tunneln. Resultaterande flödesmönster presenteras i Figur B1-16.

I Figur B1-17 presenteras resultatet från en simulering där randvillkoren på övre och nedre randen är satta lika bortsett från magasinet uppströms mätvallen som driver infiltrationen. Detta ger en bild av hur flödesmönstret ser ut för en mätvall ovan grundvattenytan dvs. vi har ingen gradient in mot tunneln men vattenmättade förhållanden i berget.

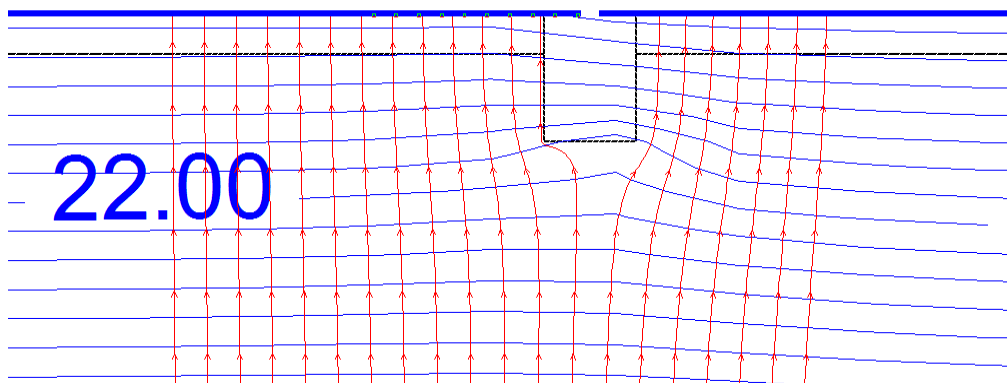
Tabell B1-4. Förändring i läckage under mätvall vid införande av injekterad zon

Konduktivitet injekterad zon, K3 (m/s)	Konduktivitet berg, K1 (m/s)	Konduktivitet störd zon, K2 (m/s)	Utströmningsområde läckage (m)	Läckage per breddmeter tunnel (L/min)	Beräknad andel läckage under mätvall per 100 m tunnel (%)
$1,0 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	0.0	0.0	0
$1,0 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	0.0	0.0	0*

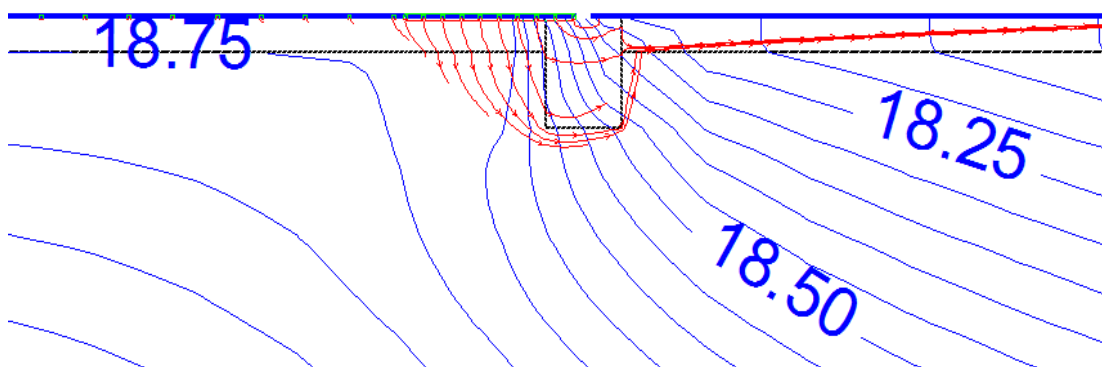
*Det simulerade inläckaget till tunnelavsnittet avviker från det ansatta värdet på 1 L/min per 100 m tunnel.



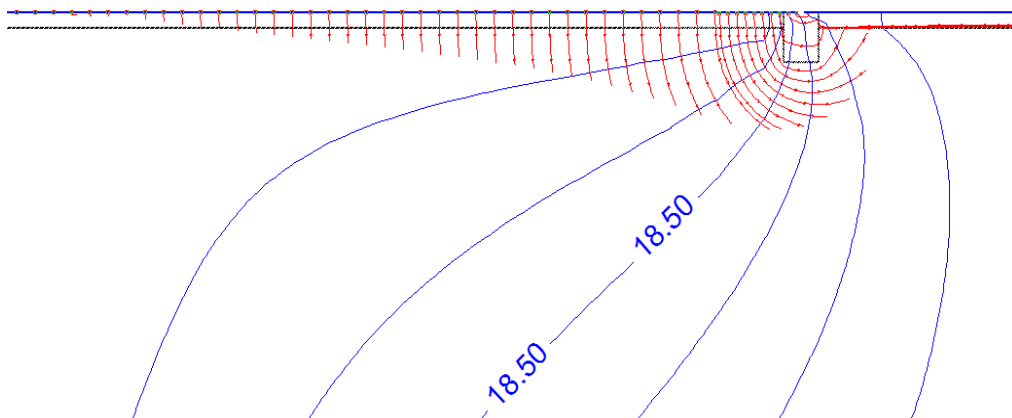
Figur B1-14. Flödesmönster med injekterad zon, $K1=1,0\cdot 10^{-8}$ m/s, $K2=1,0\cdot 10^{-6}$ m/s, $K3=1,0\cdot 10^{-9}$ m/s.



Figur B1-15. Flödesmönster med injekterad zon, $K1=1,0\cdot 10^{-6}$ m/s, $K2=1,0\cdot 10^{-6}$ m/s, $K3=1,0\cdot 10^{-9}$ m/s.



Figur B1-16. Flödesmönster med injekterad zon, $K1=1,0\cdot 10^{-8}$ m/s, $K2=1,0\cdot 10^{-6}$ m/s, $K3=1,0\cdot 10^{-9}$ m/s och en mycket låg gradient in mot tunneln.



Figur B1-17. Flödesmönster med injekterad zon, $K1=1,0\cdot 10^{-8}$ m/s, $K2=1,0\cdot 10^{-6}$ m/s, $K3=1,0\cdot 10^{-9}$ m/s och ett randvillkor på nedre randen lika med randvillkoret på övre randen. Detta är med andra ord resultatet för en mätvall anlagd på en yta utan gradient underifrån.

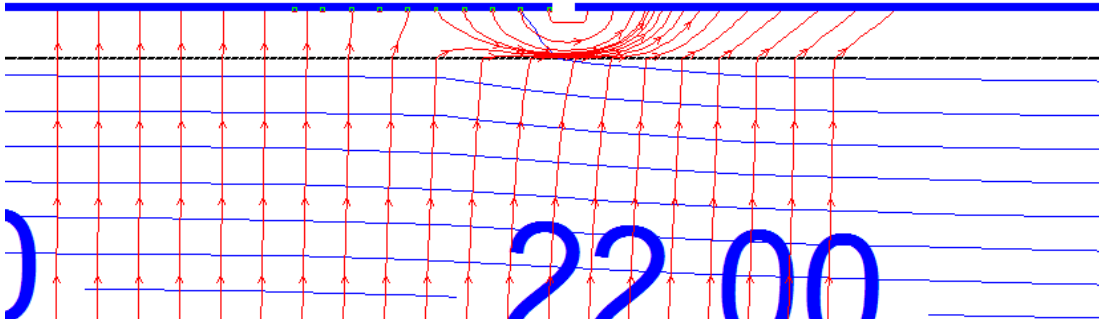
Inget av de simulerade fallen med en rimlig gradient in mot tunneln ger en trycksituation i berget där infiltration under magasinet, dvs. läckage under mätvallen, är möjlig, se B1-14 och B1-15. För situationen med $K1=K2=1,0\cdot 10^{-6}$ m/s medförde injekteringen som förväntat ingen förändring av läckage jämfört med situationen utan ridåinjektering. För en situation med gradient på ca 0,05 in mot tunneln kan dock ett flöde under mätvallen uppstå, se B1-16. Detta motsvarar en ökning i tryckhöjd från tunneln till 20 m ut i berget av ca 1 m och gradienten är med andra ord mycket liten och läckaget är försumbart. Vid större gradienter än denna förekom ej infiltration under magasinet. Detta visar som väntat att en väl genomförd injektering är en mycket effektiv åtgärd för att stoppa läckage under mätvallar.

Variation i vattennivå i magasin uppströms mätvall

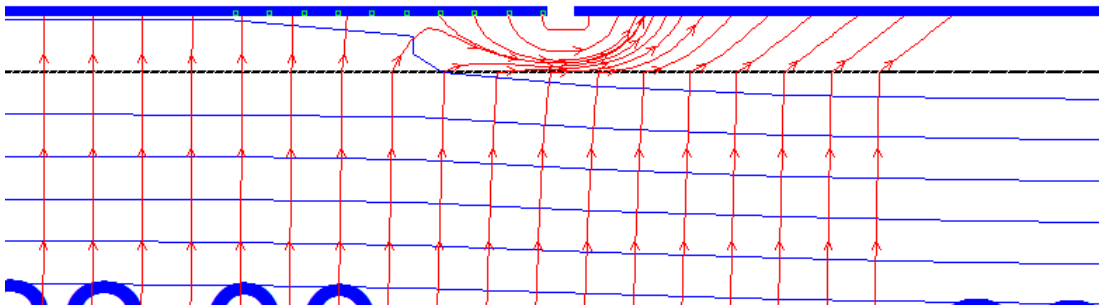
Ett ökat magasinsdjup ger ett ökat hydrostatiskt tryck under magasinet och med det en ökad infiltration. Dessutom blir magasinet längre/kortare uppströms mätvallen med ökat/minskat djup vilket också påverkar tryckförhållandena under magasinet. Simulerade magasinsdjup och resultat redovisas i Tabell B1-6. Resultaterande strömningsmönster ses i Figur B1-20 till Figur B1-24.

Tabell B1-6. Förändring i läckage under mätvall med varierat magasinsdjup

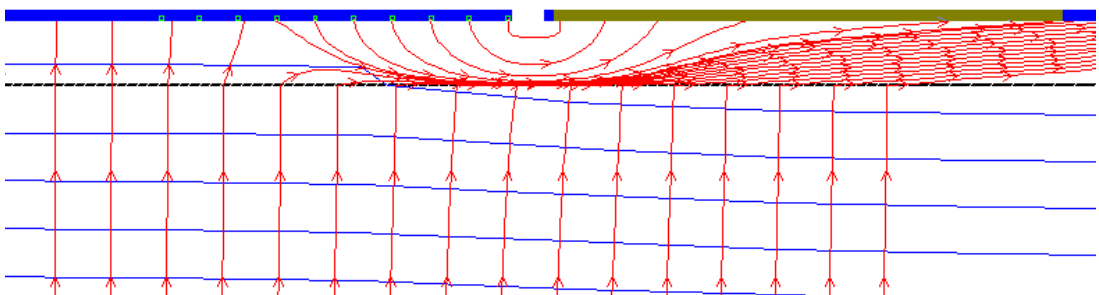
Magasinsdjup (m)	Konduktivitet berg, K1 (m/s)	Konduktivitet störd zon, K2 (m/s)	Utströmning sområde läckage (m)	Läckage per breddmeter tunnel (L/min)	Beräknad andel läckage under mätvall per 100 m tunnel (%)	Beräknat läckage relativt 1 L/min/100 m tunnel (%)
0.50	$1,0\cdot 10^{-8}$	$1,0\cdot 10^{-6}$	1.00	0.0124	5.3	12.4
0.25	$1,0\cdot 10^{-8}$	$1,0\cdot 10^{-6}$	1.00	0.0064	2.7	6.4
0.25	$1,0\cdot 10^{-8}$	$1,0\cdot 10^{-5}$	5.00	0.0647	26.1	64.7
0.10	$1,0\cdot 10^{-8}$	$1,0\cdot 10^{-6}$	0.50	0.0018	0.8	1.8
0.10	$1,0\cdot 10^{-8}$	$1,0\cdot 10^{-5}$	5.30	0.0260	10.5	26.0



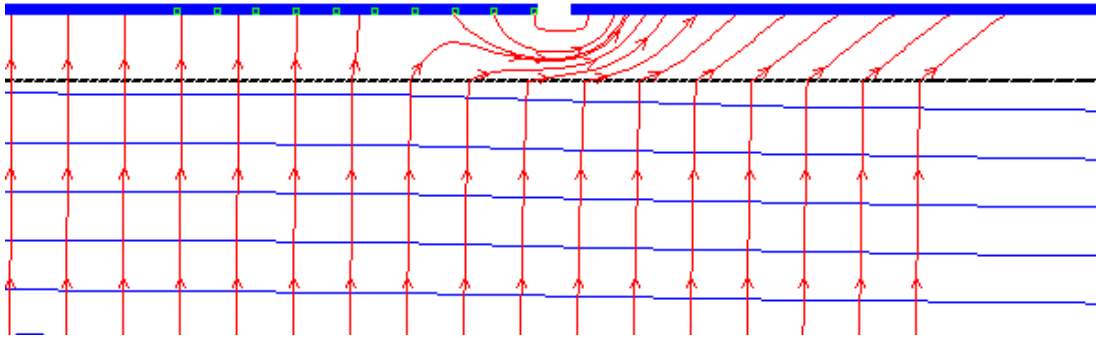
Figur B1-20. Flödesmönster under mätvall med magasinsdjup 0,5 m med $K1=1,0\cdot 10^{-8}$ m/s och $K2=1,0\cdot 10^{-6}$ m/s.



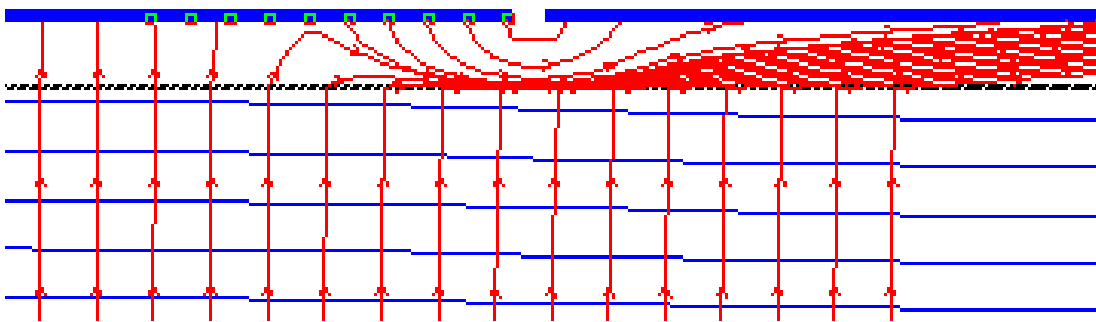
Figur B1-21. Flödesmönster under mätvall med magasinsdjup 0,25 m med $K1=1,0\cdot 10^{-8}$ m/s och $K2=1,0\cdot 10^{-6}$ m/s.



Figur B1-22. Flödesmönster under mätvall med magasinsdjup 0,25 m med $K1=1,0\cdot 10^{-8}$ m/s och $K2=1,0\cdot 10^{-5}$ m/s.

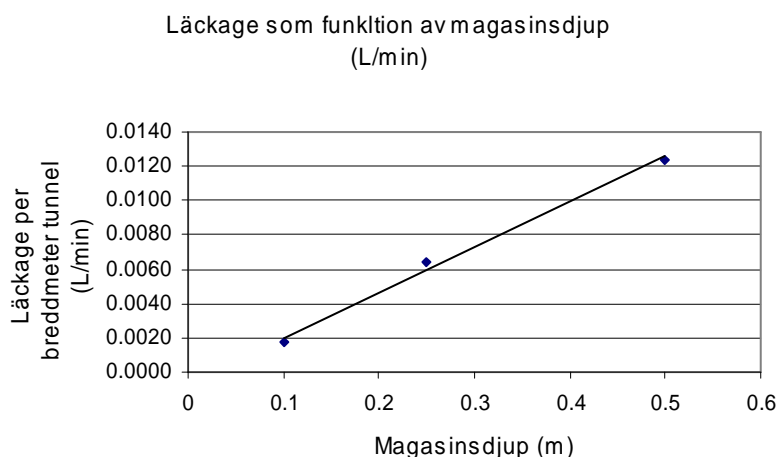


Figur B1-23. Flödesmönster under mätvall med magasinets djup 0,10 m med $K1=1,0 \cdot 10^{-8}$ m/s och $K2=1,0 \cdot 10^{-6}$ m/s.



Figur B1-24. Flödesmönster under mätvall med magasinets djup 0,10 m med $K1=1,0 \cdot 10^{-8}$ m/s och $K2=1,0 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Vid en simulerade nivåförändringar förändras magasinets längd från ca 33 m vid nivån 0,5 m till ca 7 m vid nivån 0,1 m. Vid jämförelse av flödesmönstret vid nivåerna 0,5; 0,25 och 0,10 så förändras det inte i någon större utsträckning trots stora skillnader i magasinets längd. Läckaget under mätvallen är starkt korrelerat till magasinets djup, dvs. det hydrostatiska trycket närmast mätvallen, och är nära linjärt beroende av magasinets djup. I Figur B1-25 visas det linjära sambandet för läckagets funktion av nivåförändring i magasinet. Påverkan i läckage och flödesmönster från förändring i magasinets utbredning längs tunneln är mycket liten. Vid ett magasinets djup av endast 0,1 m, som kan representera en styrvall i en tunnel, utgör andelen läckage under mätvallen enligt beräkningarna mindre än 2 % relaterat till ett ansatt maximalt flöde på 1 L/min/100m, se Tabell B1-7.



Figur B1-25. Läckaget är linjärt beroende av magasinets djup och påverkas mycket litet av förändring i magasinets utbredning längs tunneln. $K1=1,0 \cdot 10^{-8}$ m/s och $K2=1,0 \cdot 10^{-6}$ m/s.

Variation i gradient in mot tunneln

Radiellt in mot en tunnel minskar trycket från det omgivande bergets tryck till lufttryck vid tunnelväggen. Trycksituationen i den opåverkade bergmassan är beroende av regionala och lokala spricksystem och krosszoner vilka styr grundvattnets flödesmönster. Trycket i berget är generellt sett kopplat till avståndet till grundvattenytan dvs. trycket ökar med djupet men lokala avvikelser från detta är ingen ovanlighet. I ett borrhål kan interncirkulation förekomma dvs. strikt hydrostatiskt tryckförhållande råder inte i berget.

Den gradienten som driver inflödet till tunneln i modellen skapas av randvilkoren på övre och nedre randen. Randvilkorens värden för parameteruppsättningen i Tabell B1-1 har satts utgående från att tunneln har en övertäckning av något tiotal meter samt att detta ger ett beräknat inflöde som ligger i samma storleksordning som Goodmans analytiska lösning (Goodman m.fl. 1965) för 20 m avstånd till grundvattenytan.

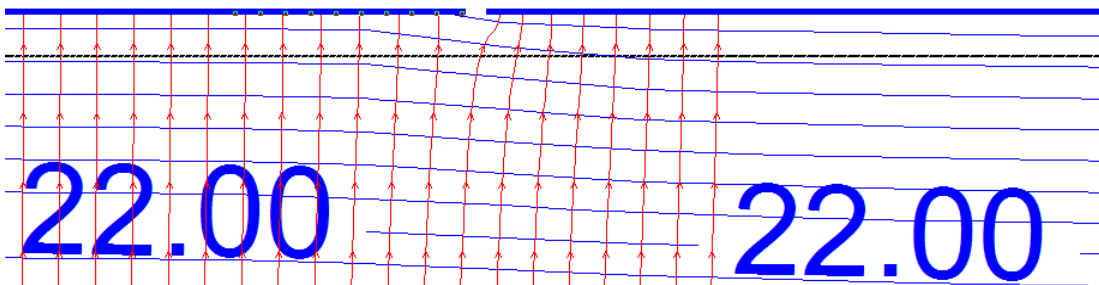
För att få en uppfattning om hur flödesmönstret ändras under mätvallen då trycket i det omgivande berget förändras har randvillkoret på den undre randen samt K-värden varierats enligt Tabell B1-7. Variationer av trycket på nedre randen har genomförts för två parameteruppsättningar av $K1$ och $K2$ för att tydliggöra och komplettera resultaten för simuleringarna under avsnitt "Variation av hydraulisk konduktivitet i bergmassa och störd zon" ovan

Kolumnen "Generaliserad gradient" i Tabell B1-7 anges som tryckskillnad mellan nedre rand och ansatt tryck på övre randen under magasinet dividerat med modellens utsträckning i y-led (20 m). Variationer i ansatta gradienter motsvaras av simulering av relativt ytliga tunnlar för låga gradienter till djupa tunnlar för fallen med de högre gradienterna. I Tabell B1-7 redovisas ansatta parametrar samt resultat från simuleringar. Flödesmönstrets förändring under mätvallen presenteras i Figur B1-26 till Figur B1-29, avstånd mellan blå isopotentiallinjer är 0,5 m vattenpelare.

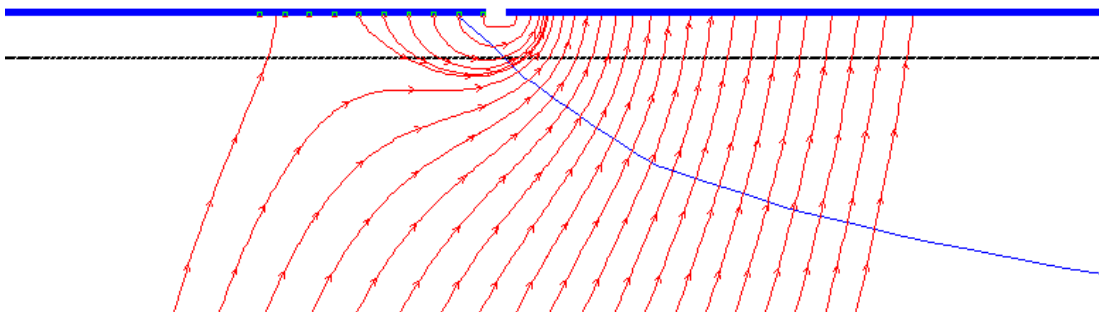
Tabell B1-7. Förändring i drivande gradient in mot tunneln

Konstant tryck nedre randen (m)	Nivå magasin (m)	Generaliserad gradient (m/m)	Konduktivitet berg, K1 (m/s)	Konduktivitet störd i zon, K2 (m/s)	Utströmning sområde läckage (m)	Läckage per breddmeter tunnel (L/min)	Beräknad andel läckage under mätvall per 100 m tunnel (%)	Beräknat läckage relativt 1 L/min per 100 m tunnel (%)
40	18.75	1.0625	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	0	0.00	0.0	0.0*
30	18.75	0.5625	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	0	0.00	0.0	0.0*
25	18.75	0.3125	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	0	0.00	0.0	0.0*
20	18.75	0.0625	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	0.6	0.0133	0.5	13.3*
30	18.75	0.5625	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	1.25	0.0124	9.5	12.4
40	18.75	1.0625	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	1.00	0.0124	5.3	12.4
80	18.75	3.0625	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	0.6	0.0103	1.6	10.3
200	18.75	9.0625	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	0.3	0.0067	0.3	6.7

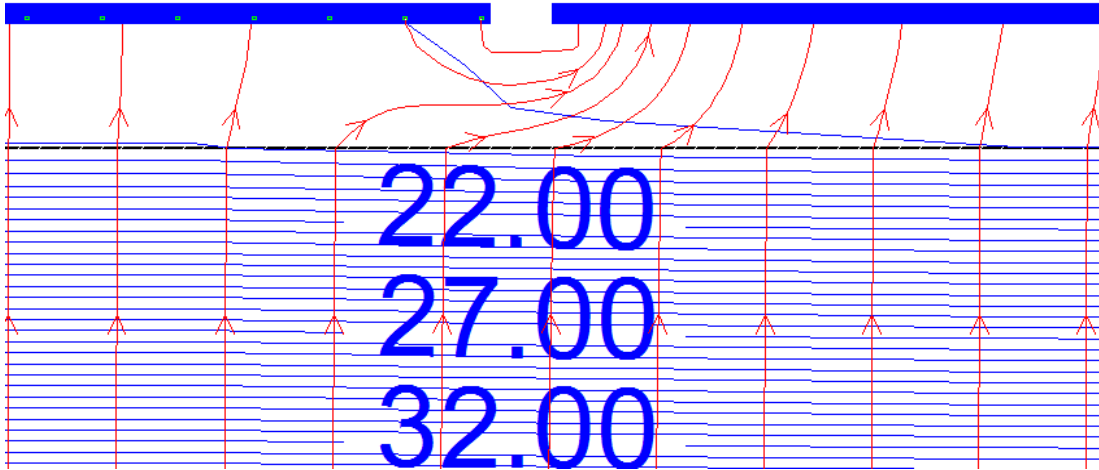
*Det simulerade inläckaget till tunnelavsnittet avviker från det ansatta värde på 1 L/min per 100 m tunnel.



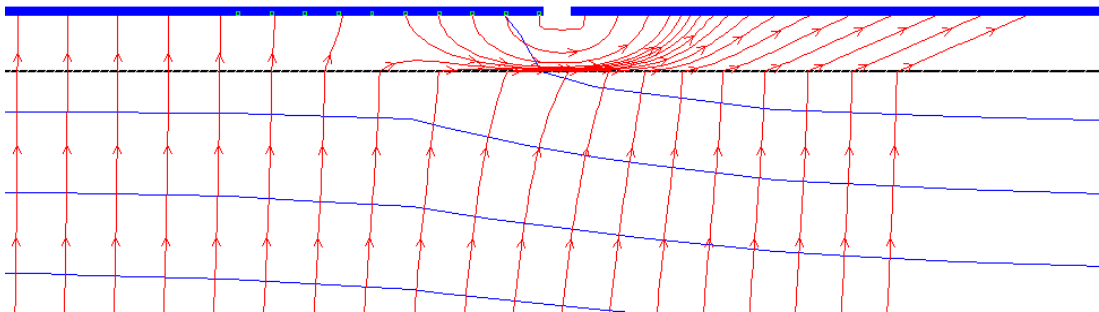
Figur B1-26. Flödesmönster under mätvall med ett ansatt konstant tryck av 40 m på den nedre randen med $K1=1,0 \cdot 10^{-6}$ m/s och $K2=1,0 \cdot 10^{-6}$ m/s



Figur B1-27. Flödesmönster under mätvall med ett ansatt konstant tryck av 20 m på den nedre randen. $K1=1,0 \cdot 10^{-6}$ m/s och $K2=1,0 \cdot 10^{-6}$ m/s



Figur B1-28. Flödesmönster under mätvall med ett ansatt konstant tryck av 200 m på den nedre randen. $K1=1,0 \cdot 10^{-8}$ m/s och $K2=1,0 \cdot 10^{-6}$ m/s



Figur B1-29. Flödesmönster under mätvall med ett ansatt konstant tryck av 30 m på den nedre randen. $K1=1,0 \cdot 10^{-8}$ m/s och $K2=1,0 \cdot 10^{-6}$ m/s

Vid homogena förhållanden med avseende på hydraulisk konduktivitet dvs. $K1=K2$ måste gradienten in mot tunneln vara mycket låg för att ett läckage under mätvallen skall uppstå. Vid en generaliserad gradient av ca 0,06 kan ett läckage konstateras men detta utgör endast 0,5 % av det totala beräknade inläckaget till tunneln per 100 m eller ca 13% relativt ett ansatt inläckage av 1 L/min/100m.

För simulering med störd zon med en skillnad på två tiopotenser i hydraulisk konduktivitet ges ett läckage för samtliga fall. Läcket under mätvallen minskar från 9,5 % till 0,3 % av det totala beräknade inläckaget till tunneln per 100 m då den generella gradienten ökar från 0,6 till 9,0. Detta motsvaras av en minskning från ca 12 % till ca 7 % läckage under mätvallen relativt ett ansatt inläckage av 1 L/min/100 m. Notera att det totala inläckaget till tunneln givetvis ökar med ökad gradient.

B.1.4. Diskussioner

En modellstudie av det slag som genomförts har en rad begränsningar i beskrivandet av verkligheten på grund av förenklingar och antaganden (se avsnitt B.1.1). Resultatet från några av de simulerade situationerna kan med hydraulisk och hydrologisk förståelse till stor del förutsås. Icke desto mindre tillför en numerisk beräkning av detta slag en bättre förståelse för systemets dynamik. Simuleringar kan också ge stöd i var förbättringsåtgärder med ekonomiska och praktiska hänsyn tagna skall sättas in då simuleringarna visar på vilka faktorer och parametrar som är viktiga i strävan att minimera läckaget under mätvallar.

Viktigt att komma ihåg är att vid stora inflöden till tunneln kan vi acceptera betydligt större läckage under mätvallen i absoluta tal och en mer ”grov” metod kan vara tillräcklig. Detta beror på att andra felkällor i flödesmätningen överstiger det fel ett förväntat läckage bidrar med.

Utgående från simuleringarna går det att konstatera att en bra utförd ridåinjektering medför att läckaget under en mätvall blir mycket begränsat. Även simuleringar utan ridåinjektering visar att läckaget under mätvallen i många fall ligger inom de marginaler som kan tänkas accepteras. Vid hydrauliska konduktivitet på $1 \cdot 10^{-6}$ m/s i störda zonen och $1 \cdot 10^{-8}$ m/s i berget blir felet relativt ett ansatt maximalt värde på 1 L/min/100 m 12,4% för parameteruppsättningen för referenssimuleringen, se Tabell 2-3. Relateras läckaget till högre tillåtna läckage blir naturligtvis andelen betydligt mindre.

Läckage under mätvallar styrs till viss del av vattennivån i magasinet uppströms. Vid simuleringar med en vattennivå av 0,1 m uppströms mätvallen med en hydraulisk konduktivitet på $1 \cdot 10^{-6}$ i den störda zonen och $1 \cdot 10^{-8}$ i berget så blev läckaget < 2 %, relaterat till ett ansatt maximalt inflöde av 1 L/min/100 m, att jämföra med 12,4% för en vattennivå på 0,5m. Man bör därför sträva efter en så låg dämningshöjd som möjligt.

Vid uppförande av en mätvall kan man lätt förledas att tro att läckaget är helt beroende av konduktiviteten i sulan, dvs. hur sprickigt det synliga berget är. Detta är definitivt fallet för konstruktioner över grundvattenytan men enligt exemplen ovan finns ett antal olika scenarion där detta inte stämmer i en tunnel belägen under grundvattenytan. Simuleringar antyder att en tunnelbotten med lägre konduktivitet kan ge ett större läckage än en mer konduktiv tunnelbotten beroende på förhållandet mellan konduktivitet i störd zon/ostört berg samt hur det omgivande trycket, som till stor del bestäms av tunneldjupet, ser ut. Detta gäller dock för det simulerade fallet med en homogen bergmassa med avseende på hydraulisk konduktivitet. I verkligheten där den hydrauliska konduktiviteten styrs av sprickförekomst så ser det annorlunda ut beroende på hur eventuella lokala sprickor i anslutning till mätvallen är kopplade till vattenförande strukturer i berget. Med andra ord är det svårt att dra slutsatser om huruvida detta faktiskt uppträder i verkligheten. För att verifiera eller förkasta modellresultatens giltighet i detta avseende krävs vidare utvärdering med faktiska mätningar av läckage vid installerade mätvallar.

Resultaten visar, som väntat, att en liten skillnad mellan K-värden i störd zon och ostört berg är mycket fördelaktigt. Detta antyder att man bör försöka finna en plats med tryckförhållanden som minimerar infiltration. Bidrag till dessa bedömningar kan göras utgående ifrån hydrauliska tester och tryckregistreringar från förundersökningar, erfarenheter från löpande kartering av tunneln under drivning, kontrollprogram för

grundvatten och eventuellt kompletterande mätningar kan med en rimlig insats ge en god bild av trycksituationen i det ostörda berget samt avsänkningen runt tunneln.

Om placering av mätvallar i ett tidigt skede görs utifrån initiell bergklassificering, vilket är önskvärt, så bör mindre förflyttningar göras utifrån karterade förhållanden på plats för att minimera risken för läckage.

Även om det är möjligt att påverka det teoretiska läckaget under mätvallen genom att utöka mätvallens tjocklek krävs i en ökning som inte ligger inom vad som kan anses praktiskt rimligt för att få en påtaglig effekt. I verkligheten kan dock en utökning av mätvallens tjocklek vara av avgörande betydelse i de fall där en större kontaktyta mot berget stänger flödesvägar samt skapar bättre förutsättningar att förhindra läckage i kontakten mellan bergytan och mätvallen.

Tillämpning av skonsam sprängning i de partier där mätvallar planeras bör övervägas. Att kvantifiera hur stora fördelarna med ett sådant förfarande är ligger inte inom ramen för detta arbete. En studie av litteratur och samlad erfarenhet vad gäller möjlighet att påverka skadezonens egenskaper och utsträckning, tillsammans med beräkningar av läckage av den typ som presenteras i detta avsnitt, bör dock kunna belysa frågan tillräckligt för att ett ställningstagande kring huruvida skonsam sprängning vid mätvallspositioner är ett fördelaktigt alternativ vid en sammantagen bedömning. Även vid skonsam sprängning finns de naturligt förekommande sprickorna. Indikation och information om dessa kan dock erhållas med hjälp av vattenförlustmätningar före sprängningen i laddhålen i tunnelbotten.



Box 5501
SE-114 85 Stockholm

info@befonline.org • www.befonline.org
Besöksadress: Storgatan 19



ISSN 1104-1773