

ELFORSK



DAMMSÄKERHET

Fillerbruk för reparationsinjektering av fyllningsdammar

Rapport 05:34

Fillerbruk för reparationsinjektering av fyllningsdammar

**Utvärdering av mekaniska egenskaper
samt den tidiga urlakningsbeständigheten**

Elforsk rapport 05:34 [rapportnummer]

Alternative reparation material based on limestone filler for grouting in embankment dams

**Evaluation of mechanical- and early
leaching properties**

Förord

Stockholm september 2005

Denna rapport är ett delresultat inom Elforsk ramprogram Dammsäkerhet.

Kraftindustrin har traditionellt satsat avsevärda resurser på forsknings och utvecklingsfrågor inom dammsäkerhetsområdet, vilket har varit en förutsättning för den framgångsrika utvecklingen av vattenkraften som energikälla i Sverige.

Målen för programmet är att långsiktigt stödja branschens policy, dvs att:

- Sannolikheten för dammbrott där människoliv kan vara hotade skall hållas på en så låg nivå att detta hot såvitt möjligt elimineras.
- Konsekvenserna i händelse av dammbrott skall genom god planering såvitt möjligt reduceras.
- Dammsäkerheten skall hållas på en god internationell nivå.

Prioriterade områden är Teknisk säkerhet, Operativ säkerhet och beredskap samt Riskanalys.

Ramprogrammet har en styrgrupp bestående av: Jonas Birkedahl – FORTUM, Malte Cederström - Vattenfall Vattenkraft, Anders Isander – Sydkraft Vattenkraft, Lennart Markland – Vattenregleringsföretagen, Urban Norstedt - Vattenfall Vattenkraft, Gunnar Sjödin – Vattenregleringsföretagen samt Lars Hammar - Elforsk

Lars Hammar
Elforsk AB

Tack till

Föreliggande rapport har utförts som ett examensarbete inom civilingenjörsutbildningen Väg- och vattenbyggnadsteknik på Kungliga tekniska högskolan, KTH, på institutionen för byggvetenskap. Examinator för examensarbetet var Håkan Stille, professor på Avdelningen för Jord- och bergmekanik. Examensarbetet har genomförts inom ramen för Vattenfall utveckling ABs verksamhet i Älvkarleby. Beställare och finansiär av projektet har varit Svenska kraftföretagens forsknings- och utvecklings AB, elforsk.

Jag vill tacka alla de personer som medverkat till att detta examensarbete har kunnat genomföras. Jag vill uttrycka ett speciellt tack till mina handledare Hillevi Sundblom och Christian Bernstone på Vattenfall utveckling och Magnus Eriksson på avdelningen för jord- och bergmekanik inom institutionen för byggvetenskap på KTH. Dessutom vill jag tacka verkstadspersonal samt labbpersonal på Betonglaboratoriet i Älvkarleby, utan vilkas hjälp laboratorieförsöken hade varit ogenomförbara. Dessutom vill jag tacka kemisten Bo Edlund för hans stora engagemang och tålmodighet när mina kemikunskaper inte räckt till och Tomas Ekstrom för mycket betydelsefull teknisk handledning.

Sammanfattning

Fillerbruk är ett cementbaserat material som också till en del består av kalksten. Materialet är tänkt att användas vid reparationsinjektering av en fyllningsdamms tätkärna. I detta examensarbete har fillerbruks lämplighet som injekteringsmaterial utvärderats och för att kunna avgöra detta bör följande egenskaper hos injekteringen undersökas:

- Tätningsförmåga
- Åldersbeständighet
- Skjuvhållfasthet
- Miljöpåverkan
- Ekonomi

Fillerbruk har i detta arbete utvärderats utifrån de tre första punkterna med den begränsningen att endast de tidiga åldersegenskaperna undersökts, vilket gjorts genom undersökning av urlakningsegenskaperna under en fyra månader lång provperiod. Slutsatsen har blivit att en injektering med fillerbruk skulle kunna fungera tillfredsställande. En injektering med fillerbruk har en hydraulisk konduktivitet som överensstämmer med en tätkärnas, de tidiga urlakningsegenskaperna visar på att fillerbruk skulle kunna ha en god åldersbeständighet och skjuvhållfastheten hos ett injekterat parti är tillräckligt låg för att det ska kunna omlagras utan att vattenförande sprickor uppkommer vid dammrörelser.

De nämnda egenskaperna har dock i en begränsad omfattning undersökts i laboratoriemiljö, varför det är rekommendabelt med en större och mer omfattande studie för att med säkerhet veta hur ett injekterat parti uppfyller de uppställda kraven.

Summary

Limestone filler is a cement-based material, which contain fine-grained cement and limestone. This mortar is intended to be used as a reparation material when grouting the core in an embankment dam. The aim of this thesis is to investigate the feasibility of limestone filler as a grouting material. When determine the feasibility you have to take these aspects into consideration.

- Sealing ability
- Age durability
- Shear strength
- Environment impact
- Economy

In this study limestone filler has been evaluated on the basis of the first three properties. The age durability of limestone filler has been investigated through a four month long leaching test and therefore it is only possible to comment on the early age properties of the grout. Through literature- and experimental study I have come to the conclusion that limestone filler ought to work satisfactory in the core of an embankment dam. The conclusion is mainly based on the following observations:

- The hydraulic convection is in conjunction with the one of a core
- The early age properties implies that a limestone grouted core has a good age durability
- The shear strength of a grouted section is low in relation to the one of the till in the core. Hence the grouted section is able to be restored in case of dam movements; under no circumstances there exist a situation where new water bearing joints are established

However, the observations above have been investigated in laboratory to a limited extent. It is recommendable with a greater and more extensive investigation of limestone filler in order to get a more secure statement of the feasibility.

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
1.1	BAKGRUND	1
1.2	PROBLEMBESKRIVNING	1
1.3	SYFTE OCH METOD.....	2
1.4	AVGRÄNSNINGAR.....	2
2	LITTERATURSTUDIE	3
2.1	INLEDNING	3
2.2	FYLLNINGSDAMMAR.....	3
2.2.1	<i>Stabilitet.....</i>	<i>6</i>
2.2.2	<i>Åldringstendenser och skadeförlopp.....</i>	<i>10</i>
2.3	INJEKTERING.....	12
2.3.1	<i>Funktionskrav på injekteringsmedel</i>	<i>13</i>
2.3.2	<i>Injekteringsmedel.....</i>	<i>14</i>
2.4	URLAKNING	15
2.5	BESKRIVNING AV FILLERBRUKET	19
2.5.1	<i>Storskaligt injekteringsförsök, 1997</i>	<i>19</i>
2.5.2	<i>Laboratorieförsök, 1999</i>	<i>19</i>
3	METOD.....	24
3.1	INLEDNING	24
3.2	MATERIAL	24
3.3	BLANDNINGAR OCH PROVUPPSÄTTNING	26
3.4	PROVBEREDNING	27
3.4.1	<i>Gjutformar.....</i>	<i>28</i>
3.4.2	<i>Blandningsförfarande.....</i>	<i>29</i>
3.4.3	<i>Lagring.....</i>	<i>29</i>
3.4.4	<i>Preparering.....</i>	<i>30</i>
3.5	URLAKNING	30
3.5.1	<i>Försöksuppställning</i>	<i>31</i>
3.5.2	<i>Provning.....</i>	<i>32</i>
3.6	TRYCKHÅLLFASTHET.....	33
3.6.1	<i>Provning.....</i>	<i>34</i>
4	RESULTAT OCH ANALYS	36
4.1	INLEDNING	36
4.2	URLAKNING	36
4.2.1	<i>Kemanalys.....</i>	<i>37</i>
4.2.2	<i>Hydraulisk konduktivitet.....</i>	<i>38</i>
4.2.3	<i>Kalciumjonkoncentration – hydraulisk konduktivitet</i>	<i>41</i>
4.3	MEKANISKA EGENSKAPER.....	43
4.3.1	<i>Tryckhållfasthet.....</i>	<i>43</i>
5	DISKUSSION.....	48
6	SLUTSATSER	50
7	REFERENSER	54

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Vattenkraft står för ca 46 % av Sveriges totala energiproduktion, något varierande från år till år beroende på vattentillgången i regleringsmagasinen. Idag finns det cirka 1200 vattenkraftverk i Sverige, varav ungefär 100 st. bidrar till i stort sett hela vattenkraftsandelens i den totala energiproduktionen. De första vattenkraftverken byggdes i början av 1900-talet. Fram till mitten av 1900-talet pågick en kraftig utbyggnad av vattenkraftverk i de svenska älvarna. Därför kräver många av anläggningarna idag omfattande reparationsåtgärder för att kunna fungera tillfredställande, vilket visar sig i form av årligen ökande anläggningskostnader [1]. De ökande anläggningskostnaderna grundar sig inte enbart på att anläggningarna börjar bli ålderstigna utan också att många av de vattenreglerande dammarna har byggts om med anledning av att det 1997 av kraftindustrin togs fram nya dimensionerande kriterier för de svenska vattenkraftanläggningarna. Dessa tillkom mot bakgrunden av att det förekom mycket höga vattenflöden orsakade av kraftiga och långvariga regn under 1980-talet. Dessa höga vattenflöden var i flera fall högre än det flöde som anläggningarna var dimensionerade för, vilket gjorde att de reglerande magasinen fylldes över den tillåtna nivån pga. att det inte gick att avbörda ett tillräckligt stort flöde. En vattenkraftsanläggning måste vara dimensionerad för mycket höga vattenflöden, även om de ur ett statistiskt perspektiv uppträder endast var tusende år. Ett dammrar skulle i många fall leda till stora förluster både i form av människoliv och ekonomiska värden. Kombinationen av ett gammalt dammbestånd, och det faktum att ett varmare klimat med ökande nederbördsmängder är att vänta har gjort att stora ekonomiska medel har och kommer att investeras i vattenkraftsproducerande anläggningar för att säkerställa en god dammsäkerhet och en trygg framtida energiproduktion.

1.2 Problembeskrivning

Sveriges dammbestånd består utifrån sin uppbyggnad av endera betong, sten eller jord. Flera av fyllningsdammarna, som är den gemensamma benämningen på dammar uppbyggda av sten eller jord, har under de senaste åren uppvisat åldringstendenser i form av ökande läckage genom dammkroppen. Detta kan vara följden av åldrande injekteringskärmar eller inre erosion i dammen. Problemet med inre erosion har i flera fall åtgärdats genom injektering av dammkroppen. Dock har flera av de material som använts för injektering ifrågasatts utifrån dess lämplighet som injekteringsmaterial i en dammkropp. Med anledning av detta har framför allt Örjan Sjöström uttryckt önskemål om att nya material skulle utvecklas specifikt för reparationsinjektering av fyllningsdammar [2].

Mot bakgrund av ovanstående gjorde Per Hansson på Vattenfall Utveckling år 1997 försök med ett nytt injekteringsmedel bestående av kalksten. Vid injektering av materialet i en simulerad dammkropp visade det sig att kalkstensbruket hade goda inträngningsegenskaper och en god tätande effekt. Dessa försök ansågs så pass intressanta att de föranledde en ytterligare studie av kalksten som injekteringsmedel.

1999 undersökte Christian Bernstone på Vattenfall Utveckling en blandning av kalksten och cement, benämnt fillerbruk, med avseende på de mekaniska egenskaperna. Denna studie omfattade dock inte undersökning av fillerbruks åldringsegenskaper, vilket är en viktig parameter för att veta hur väl den injekterade jorden uppfyller uppställda krav på t.ex. täthet efter några år i bruk.

1.3 Syfte och metod

Föreliggande examensarbete är en fortsättning på de två tidigare studierna och syftar till att undersöka lämpligheten hos fillerbruk för reparationsinjektering av en fyllningsdamms tätande zon, den s.k. tätkärnan. Fillerbruks lämplighet undersöks, förutom genom sammanställning och analys av de resultat som framkom vid de tidigare studierna av fillerbruk, också genom provning av åldringsegenskaperna.

Examensarbetet består dels av en litteraturstudie och dels av laboratorieförsök. Litteraturstudien syftar till att ge förståelse för en fyllningsdamm i sin helhet, reparationsmetoder och då i synnerhet injektering samt en redogörelse för de två föregående projekten. Det rekommenderas även för den insatte läsaren att studera de kapitel som omfattas av litteraturstudien, eftersom den underbygger analysen av resultatet från de experimentella försöken. Den laborativa delen omfattas främst av provning av åldringsegenskaper, vilket gjorts genom att studera urlakningen för ett antal provkroppar under en fyramånadersperiod. Det har används samma bruksrecept i denna studie som 1999. Den laborativa verksamheten omfattar också provning av tryckhållfastheten för att kunna göra en verifiering mot den tryckhållfasthet som uppmättes av Christian Bernstone.

1.4 Avgränsningar

Ett examensarbete vid en civilingenjörsutbildning på KTH ska omfattas av 20 veckors heltidsarbete, vilket är en relativt kort period för att utföra omfattande laboratorietester på. Följaktligen är det svårt att uttala sig om fillerbruks åldersbeständighet, varför arbetet begränsats till att undersöka fillerbruks tidiga åldringsegenskaper. Med tidiga menas här de egenskaper som kan förväntas i ett laboratorium under en begränsad tidsperiod förutsatt att samma experimentella förhållanden råder som redogörs för i denna rapport.

Med anledning av att utvärderingen av fillerbruk gjorts i laboratoriemiljö förväntas det inte av denna studie att fillerbruk vid avslutandet av projektet kommer att kunna användas kommersiellt. För att med säkerhet kunna uttala sig om fillerbruks lämplighet för injektering kommer det att krävas fullskaleförsök. Resultaten från denna studie kan däremot leda till rekommendationer om hur sådana försök ska utformas och påtala vilka brister det finns inom detta kunskapsområde.

2 Litteraturstudie

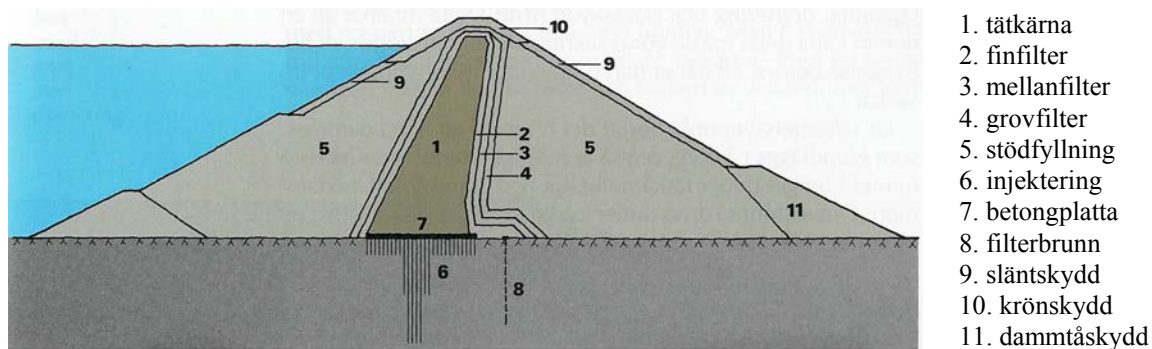
2.1 Inledning

Litteraturstudien inleds med en översiktlig beskrivning av en fyllningsdamm med dess ingående delar för att därefter behandla de skador och åldringstendenser som kan uppkomma i en damm. Den i särklass vanligast förekommande reparationsåtgärden när en dammkropp uppvisar inre försämrade egenskaper är injektering, men det har även förekommit andra metoder så som stödfyllning. Injektering beskrivs i kap. 2.2 i form av tillvägagångssätt vid injektering, olika typer av injekteringsmedel samt de funktionskrav som ställs på ett injekteringsmedel. Åldersbeständighet är ett av funktionskraven. Alla material degraderar olika med tiden beroende på en mängd olika faktorer så som t.ex. sammansättning och omgivningsförhållanden. Urlakningshastigheten av enskilda joner är ett sätt att beskriva ett cementbaserat materials nedbrytning. Undersökning av fillerbruks urlakning har en central roll i den experimentella verksamheten, vilket gör att litteraturstudiens tyngdpunkt ligger just här. (se i kap 2.3) Litteraturstudien avslutas med att presentera de arbeten som tidigare gjorts inom området fillerbruk.

Vid sökning efter litteratur använde jag mig av tekniken med nyckelord i LIBRIS litteraturdatabas. Tyvärr medgav inte denna typ av sökning så mycket information vid sökning med nyckelord som *grouting*, *triaxial testing*, *spreading* och *till (morän) +strength*. Detta har gjort att jag i litteraturstudien till stor del hänvisats till kurslitteratur och litteratur som jag använde i en förstudie om silikatinjekterings beständighet och i en mindre omfattning till publicerade artiklar [3].

2.2 Fyllningsdammar

En fyllningsdamm består av packad jord och sprängsten och förekommer i två olika typer: jorrdammar och stenfyllningsdammar. De båda dammtyperna har en tät kärna i ett finkornigt jordmaterial som begränsar vattenströmmen genom dammen. För att en damm ska betecknas som stenfyllningsdamm krävs det att sprängsten är det dominerande materialet medan en jorrdamm till största delen består av naturliga jordmaterial [4]. Den enklaste fyllningsdammen består endast av en kornfraktion som är mycket finkornig, vilket gör att den håller en hög täthet genom hela konstruktionen. Denna typ av material har en låg skjuvhållfasthet och därmed måste slänterna utformas med liten lutning för att stabilitetsproblem i form av glidning inte ska uppstå. Vid uppförandet av små dammar kan materialhomogena konstruktioner fungera väl, men för dammar som är tänkta att dämna ett stort vattenmagasin finns det normalt inte utrymme nog för den flacka släntlutningen som krävs för tillräcklig stabilitet. Mot ovanstående bakgrund började fyllningsdammar konstrueras med zoner av material med olika korngradering; en tät kärna med hög täthet i mitten som följs av grovkornigare och mer vattengenomsläppliga material utåt i konstruktionen. I Figur 2-1 visas de olika byggnadsdelarna i en fyllningsdamm.



Figur 2-1 Fyllningsdamm med central tät kärna. De är uppdelade i zoner med olika kornfraktioner för att få tillräcklig tätning och stabilitet. [5]

Det finns noggranna föreskrifter hur filter och stödfyllning ska dimensioneras med avseende på kornfraktion för att förhindra materialtransport från den tätande kärnan till stödfyllning. För finfilter, det lager som är i direktkontakt med tät kärnan, så ska dess porstorlek vara mindre än de minsta partiklarna i tät kärnan för att det genomströmmande vattnet inte ska ta med sig material utåt i konstruktionen. På samma sätt kan man resonera för de andra zonerna; utanpåliggande materials porer ska vara mindre än storleken av den minsta kornfraktionen. [5]

En förutsättning för att en damm ska fungera tillfredställande är filter som är rätt utformade. I händelse av materialtransport har filtrena en viktig funktion; om erosion pågår i t.ex. tät kärnan ska det inte påverka dammen negativt i någon nämnvärd utsträckning tack vare att finfiltret sätts igen av tät kärnans material. På så vis fastnar det eroderade materialet i finfiltret och en fortsatt materialtransport tillåts inte.

En väl fungerande damm som uppvisar god funktion och status under hela sin designade livslängd är noggrant utformad och konstruerad i alla sina ingående delar. Dock är tät kärnans funktion och status en förutsättning för en välfungerande konstruktion. En tillfredsställande tät kärna ska begränsa vattenströmmen genom dammkroppen [5], vilket endast kan åstadkommas med användning av ett konstruktionsmaterial som är finkornigt och som packas väl vid utförandet. Vid uppförandet av en fyllningsdamm försöker man i första hand att använda konstruktionsmaterial som finns i närområdet pga. de stora volymer som annars skulle behövas transporteras till platsen för dammen. Av denna anledning kan materialet i en tät kärna variera från damm till damm och därmed också dess egenskaper. Det framhålls i [5] att den ideala tätjorden är morän med följande egenskaper:

- siltig, sandig typ med finjordshalt (<0.06 mm), 15-40 % av material < 20 mm,
- hydraulisk konduktivitet 3×10^{-7} - 3×10^{-9} m/s,
- vattenkvot i fält omkring den optimala vid tung laboratoriestampning
- god packbarhet enligt provpackning,
- måttlig stenhalt,
- blockfattig,
- närbelägen.

Gränsvärdet för den högst tillåtna hydrauliska konduktiviteten hos en tät kärna bestäms utifrån tillåten vattengenomströmning genom dammen och den som kan accepteras med hänsyn till jordens stabilitet mot urspolning. I regel är högsta tillåtna konduktiviteten högre för den tillåtna vattengenomströmningen än för stabilitet mot urspolning, varför den senare är dimensionerande. Det konduktivitetsintervall som angivits för den ideala tätjorden i listan ovan är erfarenhetsbaserat för det övre värdet, medan den undre utgår från att morän med lägre konduktivitet är ogynnsam ur arbetssynpunkt och med hänsyn till konsolidering och stabilitet. [5].

Att beskriva vattenflödet i ett material är inte helt enkelt pga. att man sällan helt känner till ett materials inre struktur. Genom att betrakta storleken av vattengenomströmningen och jämföra den med andra material kan man få en känsla för materialets egenskaper. Den hydrauliska konduktiviteten är ett sätt att beskriva vattenströmningen för framförallt jordarter. Den beror av längden av materialet i vattenriktningen, L (m), skillnaden i vattentryck mellan uppströms- och nedströmssidan, Δp (mvp), det genomströmmande materialets area, A_{tot} (m²), samt storleken av det vattenflöde som passerar igenom provkroppen, q (m³/s) enligt Ekv. 2-1. [8]

$$k = q \cdot \frac{L}{\Delta p} \cdot \frac{1}{A_{tot}} \quad (m/s) \quad \text{Ekv. 2-1}$$

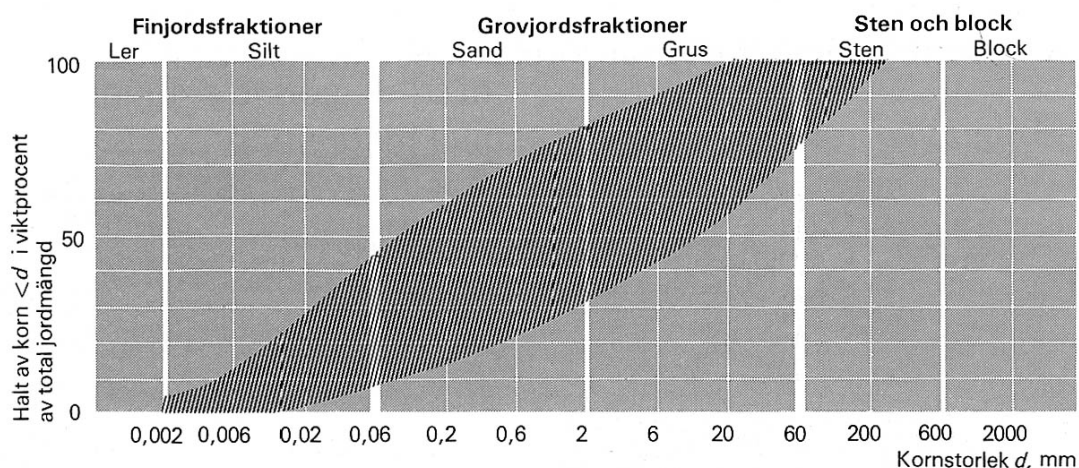
En förutsättning för att sambandet i Ekv. 2-1 ska gälla är att laminär vattenströmning råder, vilket det gör i material där vattenhastigheten är låg och porerna små. I Tabell 2-1 presenteras ungefärliga värden på hydrauliska konduktiviteten för olika typer av moräner, vilket är den jordart som förekommer i svenska fyllningsdammars tät kärnor. [7].

Tabell 2-1

Olika moräners hydrauliska konduktivitet

Moräner	Hydraulisk konduktivitet (m ³ /s m ² , m/s)
Grusig morän	10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁷
Sandig morän	10 ⁻⁶ - 10 ⁻⁸
Siltig morän	10 ⁻⁷ - 10 ⁻⁹
Lerig morän	10 ⁻⁸ - 10 ⁻¹⁰
Moränlera	10 ⁻⁹ - 10 ⁻¹¹

En kornfördelningskurva illustrerar bäst egenskaperna hos ett jordmaterial. I Figur 2-2 visas spridningen i kornfördelning, d.v.s. hur stor andelen är av en viss kornfraktion sett till den totala jordmängden hos de svenska tät kärnorna. Moränen betecknas som siltig-sandig för den mest finkorniga tät kärnan och sandig-grusig för en grovkornig.



Figur 2-2 Kornfördelning och spridning hos tätjord i svenska dammar. [5]

2.2.1 Stabilitet

Höjden på de svenska fyllningsdammarna varierar mellan allt från några meter till 130 meter, vilket är höjden på Trängslet som är Sveriges högsta damm. Konsekvenserna av dålig stabilitet hos t.ex. Trängslets damm skulle kunna bli mycket allvarliga och följaktligen finns det stabilitetskriterier som dammkonstruktioner ska uppfylla. Fyllningsdammars funktionssätt är densamma som för gravitationsdammarna i betong; den sammanlagda kraftresultanten från dammens egentyngd och det horisontella vattentrycket ska vara riktad ned mot undergrunden för tillräcklig stabilitet.

Förutom att dammen ska fungera tillfredställande ur statiskt hänseende måste det finnas tillräckligt stor säkerhet mot glidning för olika belastningsfall. Tillräcklig glidstabilitet fås då den mothållande kraften är större än den skjuvande för alla tänkta glidytor. De belastningsfall som är aktuella vid en stabilitetsberäkning av en fyllningsdamm är byggnadsskedet och första fyllning, stationär strömning samt snabb avsänkning [5]. Utöver de olika belastningsfallen ska glidyterna kontrolleras utifrån tänkta skjuvningsfall; man skiljer mellan aktiv, direkt och passiv skjuvning (se 2.2.1.1).

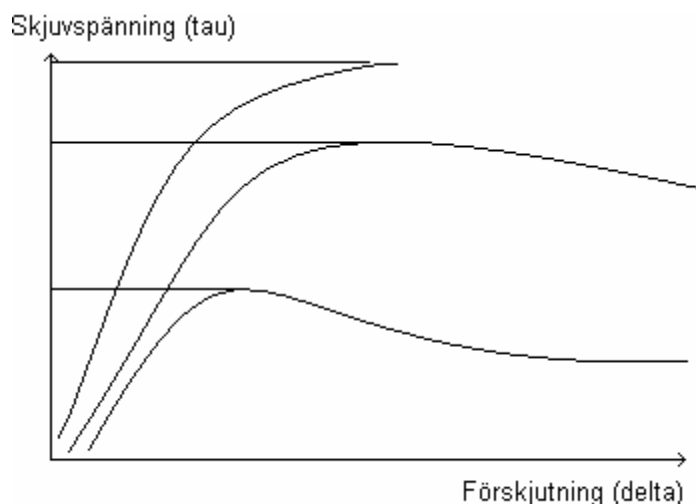
2.2.1.1 Skjuvhållfasthet

Skjuvhållfastheten är den egenskap som berättar om skjuvningsegenskaperna hos ett material. För kohesionslös jord, d.v.s. ej lera, beskrivs den som den last som krävs för att skjuvning ska uppstå i materialet, d.v.s. glidning mellan partiklarna. Jordmaterials skjuvhållfasthet är en av de viktigaste mekaniska egenskaperna att ta hänsyn till vid t.ex. utformning av slänter, skärningar, fyllningar och jorddammar [8]. Skjuvhållfastheten hos en och samma jord kan variera mycket beroende på omgivningsförhållanden. Jordens skjuvhållfasthet bestäms av markförhållanden (vattenmängd, spänningar m.m.), men påverkas även av faktorer så som förändring i grundvattennivå, skapandet av schakter och sättningar i jorden. För en god kunskap om jordmaterialets egenskaper idag är det, förutom förståelsen för hur ett jordmaterials egenskaper förändras vid en yttre påverkan, viktigt att känna till de förändringar som den har blivit utsatt för tidigare i sin historia.

Det finns flera metoder att både i fält och laboratorium undersöka skjuvhållfastheten hos ett jordmaterial. I laboratorium kan skjuvhållfastheten provas genom de metoder som redovisas i punktlistan nedan, där direkta skjuvförsök och triaxiella försök används vid bestämning av skjuvhållfastheten hos sand och grus medan konförsök vanligtvis utförs på lera. [9] Fortsättningsvis kommer beskrivningen av skjuvhållfastheten att behandla provning av sand och grus, eftersom lera vanligtvis inte förekommer i en jorddamm.

- Direkta skjuvförsök
- Triaxiella försök
- Konförsök

Vid *direkt skjuvning* innesluts jorden mellan två ramar som kan förskjutas i förhållande till varandra. Belastningen sker i två steg; först belastas jorden med ett normaltryck för att sedan belastas till brott med en skjuvspänning. Från försöken fås skjuvspänningen som funktion av förskjutningen. I fig. Figur 2-3 illustreras utseendet för sambandet mellan förskjutning och skjuvspänning för tre olika normaltryck, eftersom skjuvspänningens storlek beror av storleken på normaltrycket. Vid måttlig förskjutning sker det en ökning av skjuvspänningen, τ , till dess att ett viss skjuvspänning uppnåts. Därefter minskar skjuvspänningen vid ökad förskjutning för att sedan anta en konstant skjuvspänning vid tillräckligt stor förskjutning. Den maximala skjuvspänningen benämns som skjuvhållfasthet och asymptotvärdet som residualskjuvhållfastheten.



Figur 2-3 Skjuvhållfastheten beror av storleken på normaltrycket. Maximala skjuvspänningen benämns skjuvhållfastheten.

För att kunna utvärdera skjuvhållfasthetens normalspänningsberoende behöver man utföra två skjuvförsök under olika normalspänning. I Ekv. 2-2 formuleras detta linjära samband där skjuvhållfastheten, τ_f , beskrivs av materialets inre kohesion, c , effektivtrycket, σ_f , mot brottplanet och den inre friktionsvinkel, ϕ [8]. För sand och grus som inte har någon kohesion är $c = 0$. Index f betecknar engelskans failure och betyder brott.

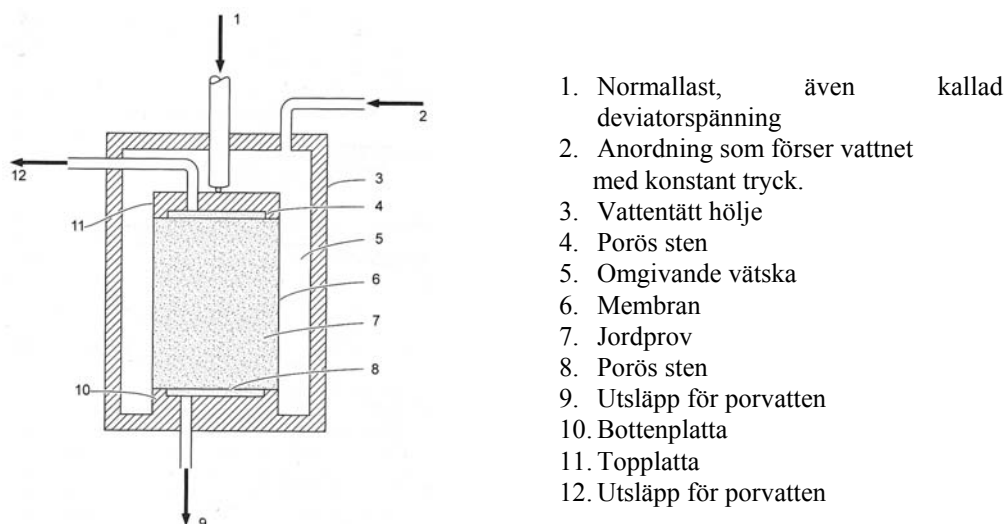
$$\tau_f = c + \sigma_f \cdot \tan \varphi$$

Ekv. 2-2

Det är dock fördelaktigt att utföra fler än två skjuvförsök, eftersom det i experimentella metoder alltid förekommer avvikande värden. Om ett material är så beskaffat så att brottytorna försvinner vid ompackning, d.v.s. lätt kan omlagras, går det att utföra alla skjuvförsök på ett och samma prov. I annat fall bestäms skjuvningsegenskaperna med hjälp av flera jordprov. Ett och samma jordmaterials egenskaper är nämligen sällan homogena och därmed måste man i de flesta fall utföra fler skjuvningsförsök för material som inte kan omlagras än för material som kan för att få en bra bestämning av skjuvningsegenskaperna.

Skjuvningsförsök kan enkelt utföras på de typer av material där inte skjuvhållfastheten i hög grad beror av yttre faktorer. Det som försvårar skjuvningsförsök av jord är det faktum att skjuvhållfastheten beror av många olika faktorer som bl.a. effektivtryck, d.v.s. det som orsakas av ovanpåliggande jord, och porvattentryck. I direkta skjuvförsök går det att som tidigare sagts variera lasten, men det går även att efterlikna olika dräneringsförhållanden och använda sig av olika belastningshastigheter - parametrar som porvattentrycket beror av. Vid direkta skjuvförsök görs därmed flera förenklingar av de förhållanden som råder i fält, vilket i olika stor utsträckning är fallet för de flesta typer av laboratorieprovningar där verkliga förhållanden ska simuleras. Skjuvhållfastheten som fås vid skjuvningsförsök är därmed sällan helt rättvisande för naturliga jordförhållanden.

Skjuvningsegenskaperna för sand och grus kan också undersökas genom *triaxiella försök*. Provningsanordningen består i att jordprovet inneslutas i en tunt cylindriskt gummimembran som förvaras i en cell som benämns triaxialcell. Hela utrustningen har ett utseende enligt Figur 2-4.



Figur 2-4 En schematisk bild över en triaxialcell med förklaring av de ingående delarna. [8]

Triaxialcellen är fylld med vatten som möjliggör att jordprovet kan utsättas för ett önskat vattentryck genom vilket man kan återskapa det omgivningstryck som finns på jorden i fält. Liksom vid direkta försök kan man prova under olika dräneringsförhållanden och normaltryck. Normaltrycket orsakat av den vertikala lasten benämns i triaxiell provning som deviatorspänning. [8] Vid all typ av laboratorieprovning vill man efterlikna förhållandena i fält så långt som möjligt för att få representativa parametrar för t.ex. stabilitetsberäkning av slänter. Provning av jord i en triaxialcell möjliggör i en långt större utsträckning än vid direkta försök en simulering av förhållandena i fält. Exempel på detta är att det går att prova under statisk och dynamisk belastning både i horisontell och vertikal led.

Vid både triaxiella och direkta försök kan man prova under olika dräneringsförhållanden. Beroende på hur provet dräneras under och före provning fås olika värden på skjuvhållfastheten. Av denna anledning är det viktigt att man innan provning funderar över vilka dräneringsförhållanden man vill simulera. Man skiljer mellan följande tre provningsmetoder [8, 9]:

1. Odränerade försök
2. Konsoliderade-odränerade försök
3. Dränerade försök

Vid *odränerade försök* belastas provet direkt efter det att det placerats i skjuvboxen. Belastningshastigheten är hög vid odränerade direkta skjuvförsök jämfört med vid dränerade, varvid det endast sker en liten förändring i vattenkvoten under belastningen. Härmed efterliknas förhållanden i fält när belastningshastigheten är hög i förhållande till jordens permeabilitet. Både vid *konsoliderade-odränerade* och *dränerade försök* blir provet utsatt för en normallast innan provning, vilket får provet att konsolidera. Skillnaden mellan de nämnda försöken är att man vid konsoliderad-odränerad provning belastar provet till brott så snabbt att det utvecklas ett portryck, vilket det inte gör vid dränerad provning tack vare att belastningshastigheten är mycket låg under samtidig dränering. [8, 9] Det saknas riktlinjer för hur dräneringsförhållanden ska simuleras vid provning, men generellt kan man säga att provningen ska baseras på vilken typ av jord som ska undersökas samt om det ska göras en korttids- eller långtidsanalys av jordprovets egenskaper.

Som förstås utifrån ovanstående resonemang är valet av belastningshastighet avgörande för vilket dräneringsförhållande som ska simuleras vid provning. Belastningshastigheten väljs utifrån om man önskar att ett portryck ska utvecklas i provet eller inte, vilket i sin tur beror av provets permeabilitet. I praktiken innebär detta att man måste känna till ett provs materialegenskaper för att kunna simulera naturligt rådande förhållanden i skjuvningsförsöken. För de vanliga kornfraktionerna går det ofta att anta att samma fraktion uppvisar liknande materialegenskaper och på så vis kan någon med grundläggande geoteknisk kunskap bestämma under vilken hastighet det betraktade provet ska belastas för att t.ex. inte ett portryck ska utvecklas. Som förstås utifrån ovanstående beskrivning är det än mer komplicerat att bestämma adekvata provningsförutsättningar vid provning av injekterad jord, eftersom materialet ofta inte

liknar något av de naturligt förekommande. En erfaren geotekniker skulle eventuellt kunna uttala sig om hur ett sådant material rimligtvis skulle provas.

Utöver simulering av olika dränerings- och lastförhållanden bör även olika skjuvningsfall beaktas vid skjuvhållfasthetsprovning. Man tidigare diskuterats skiljer man mellan aktiv, direkt och passiv skjuvning. De olika skjuvningsfallen ger olika skjuvhållfasthetsvärden; aktiv skjuvning ger generellt större hållfasthet än passiv. Vid triaxiell provning ska därför eventuellt ett representativt skjuvningsfall simuleras.

Injekteringsbruks egenskaper är svåra att relatera till egenskaper hos de vanliga kornfraktionerna så som ler, silt, sand, grus o.s.v. Det finns inte några standardiserade metoder att prova cementbaserade bruk, varför valet av belastningshastighet, dräneringsförhållanden m.m. inte är helt enkelt. Provning av injekteringsbruk som är tänkt att verka i t.ex. en tät kärna kan man tänka sig utföra under samma förhållanden som provning av tät kärnematerial. Dock är provning av tät kärnematerial inte så vanligt förekommande, vilket gör att det inte heller här finnas några anvisningar om hur en sådan provning bäst skulle kunna utföras.

I det ovanstående har jag i flera olika sammanhang belyst den knapphändiga kunskapen inom främst provning av skjuvhållfastheten. Sveriges geologiska förening, SGF, har uppmärksammat detta problem och presenterar att de ska utforma en guide för såväl enklare skjuvningsprovning som triaxiell provning för att information om tillvägagångssätt, val av parametrar m.m. vid skjuvförsök även lätt ska kunna inhämtas av icke-geotekniker så som beställare och konsulter [10]. Utöver detta anser jag att det finns ett behov av forskning och utveckling inom området för provning av främst injekterat material, men också för tät kärnematerial.

2.2.2 Åldringstendenser och skadeförlopp

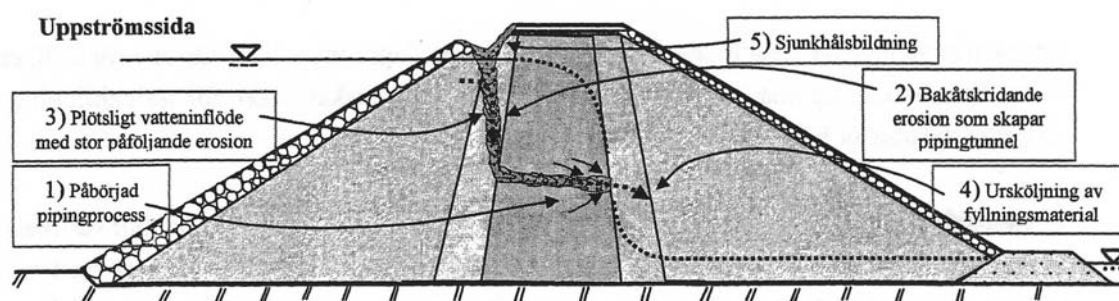
Flera av fyllningsdammarna i Sveriges dammbestand har en ålder som överstiger 50 år, vilket har medfört att flertalet av dessa uppvisat åldringstendenser i form av nedsatt funktion. Att en damm har nedsatt funktion innebär i första hand att den tillåter en större vattengenomströmning än den dimensionerade. Konsekvensen av att en damm uppvisar måttligt ökade vattenförande egenskaper är en minskad regleringsvolym och därmed minskade möjligheter att oberoende flödessituation kunna tillgodose samhällets krav på elektricitet. Denna typ av funktionsnedsättning kan dock uppfattas som liten i jämförelse med vad konsekvenserna skulle bli av en kraftigt ökad vattengenomströmning. Om vattenströmningen är så stor att den har en kraftig eroderande effekt, d.v.s. det genomströmmande vattnet tar med sig jordmaterial i strömningsriktningen, kan stabiliteten hos dammens bli så nedsatt att det finns risk för dammräs.

Orsaken till en ökning av fyllningsdammars vattenförande egenskaper kan vara flera. Många dammar har uppvisat ökad vattengenomströmning pga. *feldimensionerade filter*, vilket grundat sig i dålig kunskap om hur filtrena ska vara utformade för att inte tillåta inre erosion. På 1940-talet publicerades studier av hur välfungerande filter skulle vara utformade, men de har förfinats och kompletterats sedan dess. Det framkom vid en inventering av fyllningsdammar i Norge att de flesta dammar som uppvisat en

funktionsnedsättning hade ett alltför grovt nedströmsfilter, medan dammar konstruerade efter det att förbättrade filterkriterier infördes inte uppvisar sådana tendenser i samma omfattning. [11]. Trots de senaste 20 årens goda kunskap om hur filtrena ska vara utformade finns det dammar som haft en funktionsnedsättning orsakat av dåliga filter, vilket har förklarats med att konstruktionsfel gjordes under själva byggnadsskedet.

Andra fenomen som kan orsaka en försämring av en damms funktion är sprick- och valvbildning i tåtkärnan. Sprickbildning beror i första hand på ojämnt fördelade sättningar i dammkroppen eller i undergrunden. Sprickbildningen behöver inte nödvändigtvis leda till en markant ökning i vattengenomströmningen. En tåtkärna med stor kohesion, d.v.s. består av en hög halt lera, tillåter inte vattenströmmen att ha en eroderande effekt. En hög lerhalt är dock negativt ur den aspekten att den medverkar till att valvbildning lätt uppkommer, vilket gör att en spricka genom tåtkärnan inte förmår att täta sig själv genom omlagring i dammen. För dammar som har en tåtkärna med hög kohesion är det viktigt med välutformade filter; fortplantar sig sprickan genom filtrena finns det risk för kraftig materialtransport utåt från tåtkärnan. [4].

Det är svårt att se på en fyllningsdamm att inre erosion pågår, vilket gör att den i flera fall har fått pågå så länge att allvarliga skador uppträtt. Ett tecken på att inre erosion pågår är en ökning av ett tidigare konstant vattenflöde. En grumling av det genomströmmande vattnet kan även visa på t.ex. en materialtransport från tåtkärnan genom nedströmsfiltret. Om den inre erosionen får pågå under en längre tid kan det utvecklas en *bakåtskridande erosion*. Den kännetecknas av en erosionsprocess som börjar i gränsen mellan tåtkärna och nedströmsfilter och resulterar i uppkomsten av ett s.k. sjunkhåll, vilket illustreras i Figur 2-5.



Figur 2-5 Beskrivning av hur en utvecklad bakåtskridande erosion uppkommer med efterföljande sjunkhållsbildning. [4]

Vid *anslutning till konstruktioner* som t.ex. utskov har det i flera av Vattenfalls dammar observerats en försämrade tätningsförmåga hos jordmaterialet. Utifrån den internationella statistiken över förändrade egenskaper hos fyllningsdammarna och dammbrott går det att utläsa att det i tre fall utvecklats dammbrott pga. en påbörjad funktionsnedsättning i nämnda områden. [12] *Åldring av injekteringsskärmar* är ytterligare en orsak till inre erosion i tåtkärnan. Injekteringsskärmar går inte att betrakta som underhållsfria, för att tillräcklig täthet ska finnas mot vattenströmning under dammkroppen. [13]

De fyllningsdammar som misstänks ha en försämrad funktion instrumenteras med mätanordningar för att kunna registrera förändrade egenskaper hos dammen. Den vanligaste och enklaste typen av instrumentering är med hjälp av vattenståndsrör, genom vilka det går att observera om det sker några förändringar i dammens vattenförande egenskaper. En ökad vattengenomströmning i dammen är vanligtvis det första tecknet på att det har skett förändringar i dammkroppen. I det ovanstående behandlades några av orsakerna till en förändrad funktion hos en damm. Dock är sällan kunskapen tillräckligt stor om vad förändringen beror på och därför går det inte att bestämt säga att förändringen i dammkroppen inte medför en ytterligare funktionsnedsättning av konstruktionen. Av denna anledning brukar observerade förändringar hos en damm leda till en noggrannare undersökning av dess tillstånd med metoder som resistivitetmätning och sondering [14].

2.3 Injektering

Injektering är ett mycket vida begrepp som omfattas av både jord- och berginjektering. Vad gäller berg så används injektering uteslutande som en metod för att minska inläckage av vatten i konstruktioner så som tunnlar och bergrum. Jordinjektering används förutom i syfte att minska jordens vattenförande egenskaper som en metod för jordstabilisering. Tillvägagångssätt, metodik och material skiljer sig åt mellan berg- och jordinjektering, varför endast jordinjektering behandlas i fortsättningen.

Det används olika tekniker vid injektering av jordmaterial. Valet av teknik beror på vad man vill åstadkomma med injekteringen. Injektering kan utföras under självtryck eller genom att pressa ner injekteringsmedel med hjälp av tryck. Är svaghetszonerna vällokaliserade och har en begränsad omfattning kan man med fördel injektera under självtryck, d.v.s. fylla hålrummen med injekteringsmedel. I de flesta fall är dock kunskapen om svaghetszonerna dålig; det har bara gått att registrera att en konstruktion har en försämrad funktion. Som nämndes i 2.2.2 hinner materialtransporten i en fyllningsdamm ofta pågå under en sådan lång tid, innan den uppmärksammas, att konsekvenserna blir allvarliga för konstruktionens funktion. Vid denna typ av skadeförlopp är det svårt att åstadkomma tillräcklig täthet med bara hålfyllnadsinjektering. Genom att istället pressa ned injekteringsmedlet under högt tryck kan även små sprickor tätas. Denna teknik kallas ibland permeationsinjektering och bör utföras med största försiktighet. Blir trycket med vilket injekteringsmedlet pressas ned med för högt finns det risk för att nya läckvägar för vattnet skapas pga. att jordmaterialet i dammen spricker upp. Detta fenomen undviks genom att kontinuerligt registrera trycket. [2]

Ett vanligt tillvägagångssätt vid injektering av fyllningsdammar är att de stora läckvägarna tätas först för att därefter övergå till att behandla små spricksystem och håligheter. Förutsättningen för en lyckad injektering av de små läckvägarna är att de stora vattenförande spricksystemen och håligheterna tätats; i annat fall finns risken att använt injekteringsmedel spolats bort med vattnet. Den kraftiga vattengenomströmningen stoppas därför med hjälp av ett grovt material som snabbt härdar, medan de mindre läckvägarna tätas med ett injekteringsmedel som lätt tränger in i små utrymmen. Egenskaper som är lämpade för ett sådant injekteringsmedel är bl.a.

hög finkornighet och lång härdningstid, vilket grundar sig i att ett grovkornigt material inte tränger in i små håligheter och snabbhärdande material tillåts inte flyta in i långa spricksystem. [2]

Injektering är ett område som kan sägas sakna metoder för hur man metodiskt ska gå tillväga för att t.ex. uppfylla en nedbruten konstruktions krav på t.ex. täthet. I de flesta fall anpassas valet av injekteringsmedel och själva injekteringsförfarandet allteftersom under arbetets gång. Även efter avslutat arbete finns det inga riktigt bra metoder för att utvärdera om en konstruktion fungerar tillfredsställande. I flera fall har det krävts efterinjekteringar för att åstadkomma en damm med önskade täthetsegenskaper. Den kunskap som finns brukar anses vara baserad på erfarenheter från enskilda projekt i fält, vilket kan förmodas grunda sig i en brist på forskning inom injektering av jord. Injektering av berg och betong har däremot studerats inom olika forskningsprojekt. Jordstabilisering med hjälp av kalkcementpelare är dock ett undantag; inom detta område fanns det för några år sedan ett forskningsprogram i Sverige. [15]

2.3.1 Funktionskrav på injekteringsmedel

Det är viktigt att ett injekteringsmedels lämplighet bedöms i varje enskilt projekt, eftersom varje injekteringsarbete är unikt med sina krav och förutsättningar. Vid val av injekteringsmedel bör dock, oavsett projekt, alltid hänsyn tas till följande fyra faktorer: [16]

- Tätningsförmåga
- Beständighet
- Miljö (arbetsmiljö och omgivningspåverkan)
- Ekonomi

Den mest grundläggande tekniska egenskapen som ställs på ett injekteringsmedel är god tätningsförmåga, vilket styrs av materialparametrar som inträngningsförmåga, fyllnadsgrad och hållfasthetstillväxt/gelningstid. För att även små svaga partier ska kunna tätas krävs att injekteringsmedlet har en god inträngningsförmåga. För att åstadkomma en tätning i små sprickor/håligheter krävs det i första hand ett material med goda reologiska egenskaper¹ för att det ska kunna nå fram till själva ihopträngningen. Det som sedan bestämmer materialets förmåga att tränga in i sprickan/håligheten är bl.a. storleken på spalten och korngraderingen hos injekteringsmaterialet.

Förutom de nämnda kraven på ett injekteringsmaterial är det viktigt för ett material som ska verka i en tät kärna att dess mekaniska egenskaper överensstämmer med det naturliga dammaterialets. De mekaniska egenskaperna som avses här är elasticitetsmodul och hållfasthet, vilka båda föredras vara låga jämfört med motsvarande parametrar hos tät kärnan. Är ett hårdnat injekteringsbruk för styvt finns det risk för att det omgivande materialet hänger upp sig på den injekterade partiet vid eventuella rörelser, vilket kan leda till att nya läckvägar öppnas.

¹ Reologi är vetenskapen om materials flyt- och deformationsegenskaper.

Det ideala injekteringsbruket för injektering av en fyllningsdamms tät kärna ska därmed ha goda inträngningsegenskaper, låg styvhet, god åldersbeständighet samtidigt som det ska ha en god tätande effekt. Det kan vara svårt att åstadkomma ett sådant material. God inträngningsförmåga inverkar ofta negativt på åldersbeständigheten, eftersom ett mer visköst material snabbare urlakas på joner än ett trögflytande material. Ett material som deformeras vid rörelser, d.v.s. med låg hållfasthet och E-modul, kan även det ofta ha svårt att uppfylla uppställda funktionskrav under en tänkt livslängd pga. ökad urvaskningshastighet av joner för ett material med svagare bindningar. Av detta inses att utformningen av ett injekteringsbruk innebär kompromisser. De nämnda motsättningarna gör att sammansättningen hela tiden blir mer eller mindre en kompromiss där varje injekteringssituation får bestämma vilka egenskaper som ska prioriteras. Därmed blir förprovning i laboratorium, under de förväntade naturliga förhållandena, avgörande för att få ett så bra anpassat material som möjligt.

2.3.2 Injekteringsmedel

Förekommande injekteringsmedel kategoriseras i två huvudgrupper; dels suspensioner (oftast cementbaserade) med fasta partiklar suspenderade i vatten, dels lösningar (kemiska injekteringsmedel) som inte innehåller några partiklar. [16] Det finns många kommersiella injekteringsmedel på marknaden för olika användningsområden. I det följande beskrivs kortfattat cementbaserade- och kemiska injekteringsmedel med fokus på injektering av fyllningsdammar. För en mer omfattande beskrivning av enskilda injekteringsmedels egenskaper hänvisas läsaren till annan litteratur.

2.3.2.1 Cementbaserade injekteringsmedel

Det vanligast förekommande materialet vid injektering av fyllningsdammar är cementbaserade bruk med tillsatsmedel för att kunna styra injekteringsmedlets egenskaper. Med enbart cement och vatten har man små möjligheter att styra injekteringsmedlets egenskaper, man kan endast variera vattencementtalet och cementtyp. Vattencementtalet, vct , är förhållandet mellan vatten och fast material enligt Ekv. 2-3, vilket även är ett sätt att beskriva ett cementbaserat materials hållfasthet och flytegenskaper.

$$vct = \frac{m_{H_2O}}{m_{cement}}$$

Ekv. 2-3 [17]

För att kunna styra fler egenskaper hos cementbaserade injekteringsmedel krävs tillsatsmedel. Det finns många motsatsförhållanden vid sammansättning av ett injekteringsbruk. För en god arbet- och pumpbarhet samt god inträngningsförmåga behövs ett högt förhållande mellan det vattencementtal, vct , vilket kan medföra dålig stabilitet och täthet. Vid val av injekteringsmedel bör även hänsyn tas till hur väl materialet uppfyller uppställda funktionskrav efter några år i bruk. Ett materials förmåga att motstå åldersförändringar benämns som god åldersbeständighet. Åldersbeständigheten påverkas negativt bl.a. av urlakning (beskrivs närmare i 2.4), stora temperaturskillnader och frostangrepp (vittring).

Cementbaserade bruk med bentonit används främst i stora sprick- och krosszoner där vattengenomsläppligheten är stor. Bentonittillsatsen ger bruket god arbet- och pumpbarhet trots ett lågt vattencementtal hos bruket. Cement/bentonitbaserade bruk lämpar sig dock inte för injektering i små sprickor pga. dåliga inträngningsegenskaper. Man skulle kunna tänka sig att tillsätta flytmedel istället för bentonit i cementet för att få ett bruk med både lågt vct och goda injekteringsegenskaper. [3] Det som talar emot tillsats av flytmedel är att det injekterade partiet då blir för styvt jämfört med dammens ursprungsmaterial, vilket kan orsaka att nya läckvägar öppnas. Tillsatsen av bentonit har en hållfastsänkande funktion som motverkar ökad styvhet hos dammen. På senare år har det utvecklats extremt finkorniga injekteringscement som kan penetrera även tunna sprickor.

2.3.2.2 Kemiska injekteringsmedel

Efter behandling av de stora sprickorna/håligheterna med cementbaserade injekteringsmedel följer injektering av de små sprickorna med material med god inträngningsförmåga. Det vanligaste kemiska injekteringsmedlet inom detta användningsområde vid damminjektering har varit silikatbaserade injekteringsmedel och då främst natriumsilikat, även kallat vattenglas. Silikatbaserade injekteringsmedel är man idag mycket försiktig med att använda pga. dess uttalat dåliga beständighet och välkomnar därför andra typer av injekteringsmedel för tätning i små sprickor/håligheter. Det som är ytterst viktigt vid användning av kemiska injekteringsmedel är att det noggrant utreds att dessa inte har någon negativ miljöpåverkan. I första hand gäller detta acceleratorerna som påskyndar härdningstiden, eftersom de i vissa fall har visat sig förgifta mark och vatten [16].

2.4 Urlakning

En grundförutsättning för att urlakning ska förekomma i ett material är att det är i kontakt med vatten eller någon annan vätska. Själva urlakningen innebär att vätskan transporterar bort små partiklar från materialet ut i dess omgivning. I fortsättningen begränsar vi oss till vatten som urlakande vätska, eftersom den är vanligast för material i utomhusmiljö. Urlakningsfenomenet skiljer sig mycket åt mellan olika material beroende på inre sammansättning. Mot bakgrunden att urlakningsfenomenet för fillerbruk undersöks i den laborativa delen av projektet, beskrivs i det följande endast cementbaserade materials urlakning. Nedanstående punkter är de huvudsakliga faktorer som inverkar på cementbaserade materials urlakning, där ingen av faktorerna anses ha en större påverkan än någon annan på urlakningen. [6]

- vattnets aggressivitet
- porositet
- graden av homogenitet hos materialet
- lösligheten hos materialet.

Vattnets aggressivitet beskrivs utifrån dess kemiska sammansättning, vilket kan göras utifrån pH-värdet eller de tyska hårdhetsgraderna. Mjukt och speciellt surt vatten påskyndar urlakningen, vilket närmare beskrivs i 2.4.1.1. Vanligtvis blir urlakningen

större desto mer vatten som tillåts strömma genom materialet. Faktorer som påverkar storleken av vattenflödet är porositet och sprickor eller inhomogeniteter. Urlakningen behöver inte nödvändigtvis påskyndas av hög porositet och stora spricksystem/inhomogeniteter, eftersom det är materialets löslighet för det genomströmmande vattnet som bestämmer graden av urlakning. Det som bestämmer porositeten hos ett cementbaserat material är vattencementtalet. Urlakningen av joner medför en förändrad inre struktur hos materialet som även kan verifieras genom en nedsättning av hållfastheten och en ökad vattengenomströmning.

Det finns inte några standardiserade undersökningsmetoder för hur ett cementbaserat material förändras med åldern. Forskarna är överens om att urlakningen är en bra metod för undersökning av åldringsegenskaper och utvärdering av hur länge ett material förväntas behålla önskvärda egenskaper [6], men det finns bara några enstaka långtidsstudier gjorda inom området. Tomas Ekström [6] utförde långtidsstudier av betongs urlakning där resultaten från de laborativa försöken och matematiska modelleringar i stort sett överensstämde med avseende på hållfasthetsutveckling och urlakning av kalciumjoner. Om dessa modeller skulle förbättras skulle man vid nyproduktion kunna välja en sammansättning hos ett cementbaserat material som har åldringsegenskaper som motsvarar anläggningens/konstruktionens designade livslängd. Även vid tillståndsbedömning av redan befintliga konstruktioner som utsätts för vattengenomströmning skulle kunskapen om urlakningens påverkan på åldringsegenskaperna kunna vara till hjälp vid bedömning av omfattningen av framtida reparationsinsatser. Den standardiserade metod som finns för provning av en konstruktions vattenförande egenskaper består i att en borrhäla från en konstruktion utsätts för ett ensidigt vattentryck, där det registreras hur långt in i betongkärnan vattnet har trängt efter en viss tid. På så vis anses man få ett indirekt mått på vattengenomsläppligheten. Med denna metod går det att uttala sig om konstruktionens funktion idag, men den säger ingenting om den utveckling man kan förvänta sig för egenskaper så som hållfasthet och vattengenomsläpplighet.

2.4.1.1 Upplösningsreaktioner

Cementbaserade material genomgår en urlakning av joner vid kontakt med vatten som kännetecknas av att framför allt jonerna natrium (Na^+), kalium (K^+) och kalcium (Ca^{2+}) urlakas. [6] Det är svårt att beskriva vad som exakt händer när hårdnat cement urlakas, eftersom de kemiska föreningar som bildas vid cements hydratation är många och i flera fall mycket komplexa. Det som ytterligare försvårar en komplett beskrivning av urlakningen är att upplösningsreaktionerna i stor utsträckning beror av vattnets karaktär; mjukt² eller surt vatten har en stor lösande förmåga medan vatten med många hårdhetsgrader eller högt pH-värde har en mycket liten lösande förmåga. [20] Mot ovanstående bakgrund är den beskrivning som följer av cementkemi och upplösningsreaktioner kortfattad och ska därför inte uppfattas som fullständig. Ytterligare information kan inhämtas från [17, 19, 20]

² Mjukt vatten kännetecknas av lågt saltinnehåll. Vatten med höga halter av kalcium, magnesium och järn betecknas som hårt.

Berner (1987) har utarbetat följande konceptuella modell för portlandcements stegvisa upplösning av joner [20], i vilken läsaren kan få en allmän förståelse för upplösningmekanismerna.

1. Upplösning av *alkaliska hydroxider*.
Koncentrationen av natrium- och kalium är hög medan kalcium-, magnesium-, aluminium- och kiselkoncentrationen är låg
2. Upplösning av *kalciumhydroxid*, $\text{Ca}(\text{OH})_2$
3. Inkongruent upplösning av *svårlösliga föreningar*
Dessa föreningar kännetecknas av kalciumsilikater, kalciumaluminater och kalciumaluminiumsulfater
4. Upplösning av *magnesiumhydroxid*, $\text{Mg}(\text{OH})_2$
5. Upplösning av *kisel-, aluminium- och järnoxid*. (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3)

Berner har inte uttalat sig om tidsperioden för upplösningen av ovanstående föreningar, utan hänvisar till att den är helt beroende av materialets egenskaper och storleken på det genomströmmande vattenflödet. Han framhåller också att de olika stegen kan överlappa varandra, beroende på tillgängligheten av lösliga föreningar i strömningskanalerna och hur stor del av materialet som befinner sig i fast fas. Kemiska föreningar i vatten är generellt mer lösliga än de som befinner sig i fast tillstånd.

Natrium och kalium urlakas från föreningarna natriumhydroxid och kaliumhydroxid (NaOH och KOH) även vid mycket höga pH-värden (≈ 13) [6]. Som kan utläsas ur Berners beskrivning [20] av joners upplösning härrör kalciumjonerna från ett flertal kemiska föreningar med olika löslighetsgrad. Den största andelen urlakade kalciumjoner har spjälkats loss från kalciumhydroxid, vilken är mycket vanligt förekommande i hydratiserat cement. Kalciumhydroxid förekommer som separata kristaller i cement, men kan även spjälkas loss från cementgelen. [6] Det som ytterligare talar för att urlakade kalciumjoner till största delen härrör från kalciumhydroxid är att denna förening är förhållandevis löslig i vatten. Det som också kunde utläsas från Berners konceptuella modell är att det även finns kalciumföreningar i form av t.ex. kalciumsilikat, kalciumaluminat och kalciumaluminiumsulfat från vilka kalciumjoner kan urlakas. Dessa upplöses följaktligen i mindre omfattning än kalciumhydroxiden pga. de nämnda föreningarnas dåliga löslighet i vatten.

Urlakningen kan ske genom diffusion enbart eller genom både diffusion och konvektion samtidigt. Urlakning av joner genom diffusion styrs av en koncentrationsgradient mellan det genomströmmande vattnet och porvattnet, vilket får joner att transporteras i riktning mot lägre koncentrationer. En diffusionsstyrd jontransport förutsätter mycket små flödeskanaler i materialet och kan innebära att joner förflyttar sig i den motsatta riktningen från strömningsriktningen. Konvektion drivs av en tryckskillnad, där jonerna förflyttar sig i den riktning som tryckskillnaden pekar. Enligt de studier som Tomas

Ekström gjorde på betongs urlakning så är det den konvektionsstyrda urlakningen som dominerar för material med hög porositet.

Vid betraktande av urlakning av fillerbruk så måste hänsyn tas till att cement blandats med kalksten som kemiskt betecknas som kalciumkarbonat, CaCO_3 . Vid kontakt med kolsyra upplöses kalciumkarbonat i kalciumjoner och vätekarbonat. Det kan vara svårt att veta vilka reaktioner som förekommer i en materialmatris och därmed kan en studering av pH- värdet vara till stor hjälp. Genom pH-värdet kan man t.ex. avgöra om en reaktion som kräver en syras närvaro kan tänkas uppträda. Vi diskuterar kalciumkarbonats reaktion med kolsyra för att ytterligare exemplifiera detta. Anta att det vatten som är i kontakt med en matris innehållande bland annat kalciumkarbonat är basiskt. Bara genom denna observation går det att dra slutsatsen att kalciumkarbonat inte reagerar med kolsyra, eftersom en sådan reaktion förutsätter en sur lösning. Kalciumkarbonat är i ringa omfattning lösligt i avjoniserat vatten ($\text{pH} \approx 6$), vilket gör att det går att anta att de kalciumjoner som urlakas från fillerbruk till största del härstammar från de kalciumföreningar som bildas vid cements hydratation.

2.4.1.2 Tidigare studier av urlakning

Det har gjorts ett fåtal studier beträffande cementbruks urlakning. Både Moskvina [21] och Sundius [22] observerade i deras försök att urlakningshastigheten vanligtvis minskade när porväggarna i de stora flödeskanalerna blivit förbrukade på kalk. Dessa flödeskanaler kan vara sprickor eller vara belägna i området för anliggande konstruktioner. I försöken utförda av Moskvina fanns det en minskning i urlakningshastigheten efter det att en specifik volym vatten hade passerat genom provet. Slutsatsen blev att det bildats tydliga läckvägar, vilka tillåter ökad vattengenomströmning. Dessa urlakas snabbt på kalciumjoner och följaktligen minskar urlakningshastigheten.

Vid en kraftig urlakning av joner går det att anta en mätbar nedsättning av hållfastheten, men även en ökning av hastigheten med vilken vatten kan passera genom provet. En hållfasthetssänkning orsakad av urlakning har påvisats av bl.a. [23]. I den urlakningsstudie som Tomas Ekström gjorde av betong framkom det att spridningen i hållfastheten var stor, vilket förklarades med att variationerna i urlakning var stora i olika delar av provet. Det observerades t.ex. att det hade skett en porositetsökning på den sidan av provet där vattnet strömmade in pga. en tydlig urlakning av framförallt kalcium genom diffusion till uppströmsvattnet.

Urlakningens påverkan på vattenhastigheten, konduktiviteten, är enligt studier gjorda av Tomas Ekström [6] starkt beroende av hur betongen behandlas innan och under provningen. För prover som aldrig blivit utsatta för torkning uppmättes en låg konduktivitet som långsamt ökade med urlakningstiden. Om betongen får torka ut efter det att den varit vattenmättad för att sedan vattenmätta den igen så visar det sig att konduktiviteten ökar med en faktor 100 jämfört med de prover som inte hade blivit utsatta för någon torkning. De torkade provernas konduktivitet minskade dock ganska snart efter att ha uppnått sitt maxvärde och samma konduktivitet uppmättes för såväl torkade som icke torkade prover vid försökens avslutande.

Hagen-Poiseuilles lag beskriver vattenströmningens beroende av uppkomna flödeskanaler i ett material. [24] Lagen säger att vattenflödet i ett cirkulär cylindriskt rör är proportionellt mot radien upphöjt till fyra enligt. Detta innebär att det blir en kraftig ökning i det vatten som kan strömma igenom materialet redan vid bildandet av små flödeskanaler. Tomas Ekström observerade prover med en snabbt ökande vattengenomströmning och såg vid en noga undersökning av provets inre struktur att flödeskanaler hade bildats. Med hjälp av Hagen-Poiseuilles lag kunde därmed den kraftiga ökningen i vattengenomströmningen förklaras.

2.5 Beskrivning av fillerbruket

Fillerbruk består till en del av kalksten och till en annan av cement. Filler är en beteckning som används för ballastmaterial med en mindre kornstorlek än 0,125 mm [17], vilket gör att använd kalksten kan betecknas som filler. Som jämförelse så karakteriseras sand utifrån fraktionsgränserna 0,06 till 2 mm. I det följande beskrivs de två studier som föranledde föreliggande projekt. För att förstå vad som ligger till grund för provningen i detta projekt och de slutsatser som kommer fram föreslås läsaren studera detta kapitel.

2.5.1 Storskaligt injekteringsförsök, 1997

1997 genomfördes ett VASO finansierat projekt försök³ på Vattenfall Utveckling, där en suspension av finmald dolomitkalksten och flytmedel injekterades i en sandbädd. När injekteringen grävdes fram två dagar senare visade det sig att kalkstenen sedimenterat till en mycket kompakt lagring motsvarande mekanisk packning av välgraderad jord. Det framkom också att materialet uppvisade plastisk deformation, d.v.s. var tixotrop. Dessa försök ansågs tillräckligt intressanta för att ytterligare undersöka kalkstens lämplighet som ett material vid reparationsinjektering av en jorrdamms tätjärna.

2.5.2 Laborieförsök, 1999

Som en fortsättning på injekteringsförsöken 1997 undersöktes 1999 kalkstensbruk med avseende på några mekaniska egenskaper. Projektet utfördes på Vattenfall Utveckling och var finansierat av Vattenfall Vattenkraften. Vid försöksplaneringen 1999 ansågs det inte gynnsamt ur beständighetssynpunkt att enbart använda sig av finmald kalksten vid en injektering, så som det gjordes vid injekteringsförsöket i sandbädden. För att göra bruket mer beständigt kom valdes därför en blandning av kalksten och cement. Cement får bruket att hålla ihop via starkare bindningar genom hydratationen⁴, i vilken bruket hårdnar. Den finmalda kalkstenen är nämligen inert, d.v.s. den medverkar varken till några kemiska reaktioner i bruket i torrt tillstånd eller i kontakt med vatten. Det krävs

³ Försöken genomfördes i samband med ett möte mellan kanadensiska BC Hydro och VASO dammkommitté. De hade under en period under 1990-talet ett forskningssamarbete inom området tillståndsbedömning och reparation av fyllningsdammar.

⁴ Cement hårdnar vid kontakt med vatten, vilket kallas cements hydratation.

en noggrann övervägning vid valet av andelen inblandat cement i fillerbruket; en stor andel cement medför att fillerbruket blir för styvt och en liten inblandning kan inverka negativt på beständigheten genom svaga bindningar mellan partiklarna. Användningen av ett styvt injekteringsbruk, d.v.s. med hög hållfasthet och E-modul, vid reparation av en jorddamms tätjärna kan resultera i att det injekterade partiet inte kan följa dammens rörelser och därmed spricka upp och bilda läckvägar. Önskvärt är därför ett material som samverkar med dammen vid rörelser. Med låg hållfasthet och E-modul hos det hårdnande injekteringsbruket finns det möjlighet för materialet som injekterats att omlagras vid dammrörelser.

Morän är som tidigare sagts den vanligast förekommande jordarten i en fyllningsdamms tätjärna och för att kunna avgöra om ett injekteringsbruk har en låg hållfasthet jämfört med tätjärnan måste man känna till vilken hållfasthet moränen har. Eftersom skjuvhållfastheten beror av t.ex. porvattentryck så varierar den beroende på var i dammen man befinner sig. Om man betraktar morän som jordart så har den högst skjuvhållfasthet av alla jordarter. Vanliga värden på skjuvhållfastheten är 100 kPa, men den kan även uppgå till 200-300 kPa för moränlera/lermorän. [25] Morän skiljer sig dock mycket åt från injekteringsbruk vad gäller skjuvningsegenskaper. Morän har en hög inre friktion och ingen kohesion medan ett injekteringsbruk har motsatta egenskaper, vilket gör att det är svårt att endast betrakta rena skjuvhållfasthetsvärden vid undersökning av hur en injektering kommer att samverka i en dammkropp. För en bra kunskap om detta krävs en närmare undersökning av en injektering i en dammkropp. Information om storleken av E-modulen för morän är knapphändig varpå även denna skulle behöva undersökas i fält eller laboratorium.

De ingående materialen i fillerbruket valdes utifrån den korngradering som vanligen tätfyllnadsmaterialet i svenska jorddammar består av. En bra utformad tätjärna skall vara uppbyggd av sandiga eller siltiga moräner, där 15-40 % av materialet är mindre än 20 mm (se kap. 2.2). Det använda cementet hade en maximal kornstorlek på 0,012 mm kalkstenen 0,02 mm.

Fillerbruket undersöktes med avseende på två olika proportioner mellan cement och kalksten; 70 respektive 50 % inblandning av kalksten i förhållande till den sammanlagda torrsubstansen (cement och kalksten). Vatteninnehållet i fillerbruket var lika stort som den sammanlagda torrsubstansen, vilket kan uttryckas med hjälp av vattencementtalet, vct (se även 2.4). Vattencementtalet för fillerbruk skulle därmed bli två. Betong med detta vattencementtal anses ha en mycket låg hållfasthet och hög permeabilitet. Den höga permeabiliteten medför i sin tur en hög utvaskningshastighet av först lösliga joner för att sedan även av de mer svårlösliga, vilket kan medföra en dålig åldersbeständighet hos materialet. Vad som talar emot att fillerbruket skulle ha en dålig åldersbeständighet är den observerade hårda packningen av kalksten vid försöken 1997. Detta tyder på att den finmalda kalkstenen har en tätande effekt, trots att den i sig inte medverkar till några kemiska reaktioner som får materialet att hårdna.

2.5.2.1 Provning

I de försök som gjordes år 1999 av Vattenfall Utveckling provades fillerbruket med avseende på enaxiell tryckhållfasthet, skjuvhållfasthet och permeabilitet. Injekteringen av fillerbruket i tåtkärnan efterliknades i laboratorieförsöken med att bruket bestående av vatten, cement och kalksten blandades med en standardsand. De ingående materialen i det laboratorieprovade fillerbruket hade karaktäristika enligt Tabell 2-2:

Tabell 2-2

Materialspecifikation för fillerbruk

	Beteckning	Tillverkare	Max. kornstorlek
Kalksten	myanit	Omya AB	20 µm
Cement	UF-12	Cementa AB	12 µm
Sand	normsand		

Av de provade egenskaperna är det främst skjuvhållfastheten som är intressant för att kunna utvärdera fillerbruks lämplighet vid injektering av en fyllningsdamms tåtkärna. Är skjuvhållfastheten för hög finns det liten eller ingen möjlighet för den injekterade tåtkärnan att omlagras vid dammrörelser, vilket gör att vattenförande spricksystem kan utvecklas. Anledningen till att även den enaxiella tryckhållfastheten undersöktes var för att kunna undersöka hur väl denna överensstämde med skjuvhållfastheten. Permeabiliteten, d.v.s. materialets förmåga att släppa igenom vatten, undersöktes för en provkropp innehållande den högre andelen kalksten. Skjuvhållfasthets- och permeabilitetsprovningen utfördes på Statens geotekniska institut, SGI, vid 28 dagars mognadstid. De hade förvarats i tempererat vattenband fram till provning. Efter denna tidpunkt finns det anledning att tro att fillerbruk inte genomgår någon större förändring i egenskaper mot bakgrunden att fillerbruk antas ha en högre permeabilitet än betong. Desto porösare ett material är ju kortare är dess hårdnandefas och studier har visat att betong endast genomgår en liten strukturförändring och hållfasthetstillväxt efter 28 dagars mognadstid. Av denna anledning provas vanligen betong 28 dagar efter gjutning.

Vid triaxialprovning av ett materials skjuvhållfasthet i laboratorium är det viktigt att fundera på under vilka förhållanden man vill prova materialet. Som diskuterades i kap. 2.2.1 skiljer man mellan aktiv, direkt och passiv skjuvning, där aktiva skjuvförsök ger den högsta hållfastheten. Vid provning av fillerbruk utfördes det aktiva skjuvförsök, eftersom ett av kraven på injekteringsmaterial för reparation av en tåtkärna är att skjuvhållfastheten ska vara låg. Vid provningen ska förutom skjuvningsfall dräneringsfall (se kap 2.2.1.1) simuleras. Man valde att genomföra dränerade försök med anledning av att långtidsförhållanden ville simuleras. För att inte ett inre porvattentryck ska utvecklas krävs det att belastningshastigheten vid provning är låg. Skjuvningsförsöken av fillerbruk utfördes med en hastighet av 0,2 millimeters deformation per minut, vilket kan jämföras med en belastningshastighet av 0,017

mm/min som användes vid dränerade skjuvförsök av jord stabiliserat med kalkcementpelarteknik.⁵

I det följande redovisas de resultat som framkom i denna studie. Studien omfattades inte av någon analys av provningsresultaten. För analys se 4.3. Av denna anledning utvärderas dessa resultat tillsammans med de resultat som framkommer vid provningen i föreliggande projekt i denna rapport.

Tabell 2-3

Resultat från tryckhållfasthetsprovning

Prov	Ålder (dygn)	Tryckhållfasthet (MPa)	Belastningshastighet t (kN/s)
70/30	28+4	2,27	1,0
70/30	28+4	2,14	1,0
70/30	28+4	1,88	1,0
50/50	28+4	7,95	1,0
50/50	28+4	6,78	1,0
50/50	28+4	7,29	1,0

Beteckningen 70/30 avser den blandning innehållande 70 % kalksten och 30 % cement i förhållande till den totala torrsubstansmängden (cement + kalksten) och beteckningen 50/50 syftar på den blandning som innehåller lika delar cement och kalksten.

Tabell 2-4

Resultat skjuvförsök

Blandning	Celltryck (kPa)	Skjuvhållfasthet (MPa)
70/30	50	4,5
	100	4,4
	200	1,5
50/50	50	2
	100	1,2
	200	4,7

Som ses i Tabell 2-4 provades de två fillerbruksblandningarna under tre olika celltryck. De resultatfiler som fanns tillgängliga var svårtydda pga. att sambandet mellan deformation och skjuvhållfasthet visades i samma diagram för alla försök och linjerna sammanstrålar på flera ställen. Resultaten redovisas i bilaga C. Trenden för skjuvhållfastheten är att den sjunker med ökande celltryck för 70/30-blandningen, medan 50/50-blandningen inte uppvisar någon tydlig trend.

⁵ Jordar som innehåller lermineral kan stabiliseras genom att en blandning av kalk och cement rörs ned i jorden.

Tabell 2-5

Resultat från permeabilitetsprovning

Prov	Tid för stabilisering (dygn)	Permeabilitet (m/s)
70/30	28	$8,26 \cdot 10^{-9}$

Permeabiliteten mäts i meter per sekund och är ett mått på hur lätt ett material släpper igenom vatten. Vid permeabilitetsprovning låter man vatten passera genom ett prov och permeabiliteten är bestämd när vattenhastigheten stabiliserats.

3 Metod

3.1 Inledning

Den experimentella verksamheten har bestått i att undersöka några av fillerbruks egenskaper i en välkontrollerad laborationsmiljö. Syftet med utförda försök har varit att öka kunskapen om utvalda egenskaper hos fillerbruket som är viktiga för ett injekteringsmaterial vid injektering av en jorddamms tätjärna. Föreliggande studie av fillerbruk domineras av undersökning av den urlakning som materialet genomgår och hur det påverkar dess egenskaper. Fillerbruket har även provats map. tryckhållfastheten för att kunna göra en validering av de resultat som framkommer i denna studie mot de resultat som framkom i tryckhållfasthetsprovningen av fillerbruk 1999. Överensstämmer resultaten från båda tryckhållfasthetsprovningarna kan fillerbruks egenskaper i denna rapport även utvärderas utifrån den tidigare studien och därmed kan en mer sammansatt bild fås av materialets egenskaper.

Dessutom har injekterade provkroppar med bruk av enbart cement undersökts med avseende på tryckhållfastheten för att undersöka till vilken grad tryckhållfastheten sjunker vid inblandning av kalksten. Som framgick i 2.3.1 är ett av funktionskraven vid injektering av en jorddamm att bruket ska ha en låg hållfasthet, motsvarande den för det injekterade materialet. Genom en korrekt inblandning av cement är hypotesen att fillerbruket ska kunna uppfylla detta krav, vilket i detta arbete undersöks genom en absolut bestämning av tryckhållfastheten för fillerbruk och en relativ mellan fillerbruk och ren cement.

3.2 Material

För att åstadkomma en simulerad injektering av en tätjärna i laboratoriemiljö har fillerbruket injekterats i en så kallad normsand. Tabell 3-1 visar de ingående materialens kornstorlek och tillverkare.

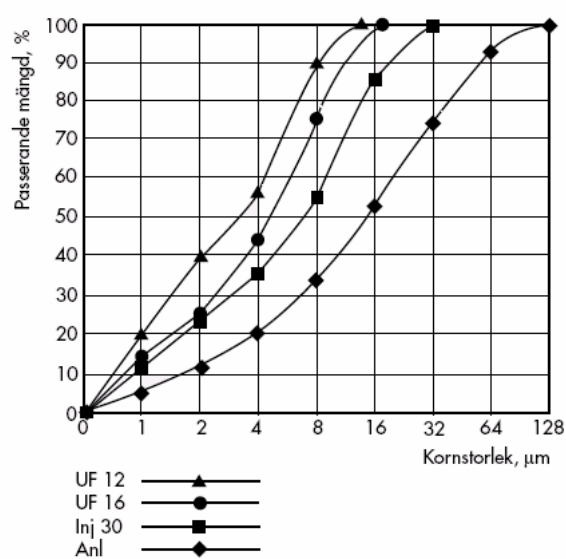
Tabell 3-1

Specifikation på de ingående materialen i fillerbruk

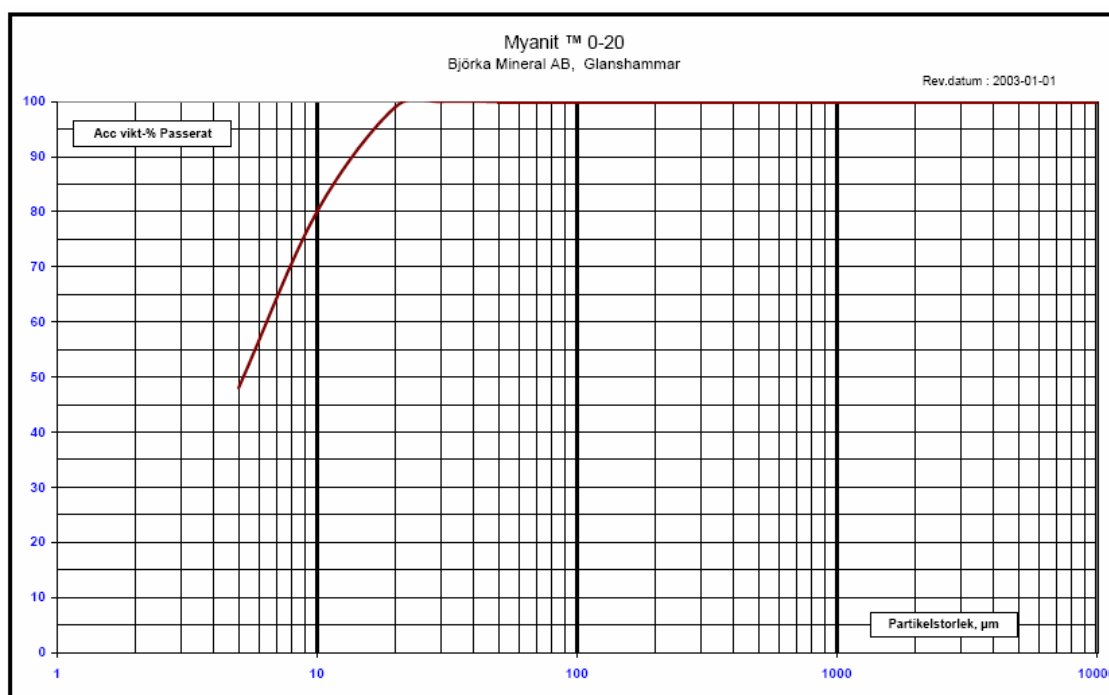
	Beteckning	Tillverkare	Max . kornstorlek
Kalksten	myanit	Omya AB	20 µm
Cement	UF-12	Cementa AB	12 µm
Sand	normsand		2 mm

Cementa AB uppgav att andelen bränd kalk, CaO, i UF-12 är 64,7 %.

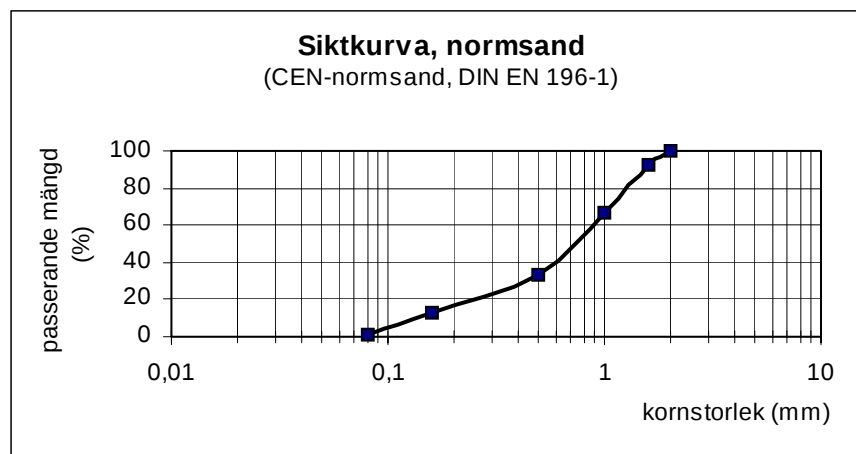
I Figur 3-1, Figur 3-2 och Figur 3-3 redovisas siktkurvorna för cement, kalksten och sand.



Figur 3-1 Siktkurva för använt cement, UF 12. Maximal kornstorlek 12 µm.



Figur 3-2 Siktkurva för kalkstenen i fillerbruket. Maximala partikelstorleken är 20 µm.



Figur 3-3 Siktcurva för använd normsand. Maximal partikelstorlek är 2 mm och endast 1 % av materialet har en kornstorlek som är mindre än 0,08 mm.

Utifrån Figur 2-2 av kornfördelning och spridning hos tätjord i svenska dammar går det att konstatera att normsanden är något grövre i kornstorlek än moränen i en normal tätkärna. Normsanden har en mindre andel av mycket finkorniga partiklar jämfört med moränen. Det finns en mycket liten mängd av finjordsfraktionerna ler och silt i normsanden, medan de är mer vanligt förekommande i tätkärnans morän.

3.3 Blandningar och provuppsättning

Fillerbruket har undersökts med avseende på två olika blandningar; en innehållande lika delar cement och kalksten och en annan med 70 % inblandning av myanit och 30 % cement. Dessa kommer i fortsättningen att benämnas 50/50- respektive 70/30-blandningen. Samma förhållande mellan kalksten och cement undersöktes även av Vattenfall Utveckling 1999.

I studien har det ingått sex provkroppar med fillerbruk för undersökning av urlakning och åtta stycken för undersökning av materialets tryckhållfasthet. Dessutom har fyra provkroppar injekterats med ett rent cementbruk, vilka också studerats med avseende på tryckhållfastheten. I Tabell 3-2 redovisas provuppsättningen.

Tabell 3-2

Sammanställning av ingående provkroppar i studien

	70/30-blandning	50/50-blandning	Referensprover
Urlakningsprovning	2	4	
Tryckhållfasthetsprovning	4	4	4 (cement)

För att få ett större statistisk underlag i resultaten skulle det ha varit önskvärt med en större provuppsättning. Antalet prover valdes dock utifrån ett praktiskt hänseende; det hade varit svårt att hantera ett större antal urlakningsprovkroppar och tryckhållfasthetsprovningen syftade främst till att undersöka repeterbarheten hos materialet och inte spridningen i hållfasthet.

För att kunna särskilja provkropparna åt vid presentationen av resultaten från provningen har de numrerats utifrån det system som presenteras i Tabell 3-3.

Tabell 3-3

Använd numrering av urlakningsprovkropparna

	70/30-blandning	50/50-blandning
Nummer	1,2	3,4,5,6

I Tabell 3-4 redovisas använd mängd bruk och sand för respektive sats av de två fillerbruksblandningarna och cementbruket.

Tabell 3-4

Mängdspecifikation för de olika blandningarna och satserna

	Sats	Myanit (g)	Cement (g)	Vatten (g)	Sand (g)
70/30- blandningen (70 % myanit, 30 % cement)	1	3183	1356	4536	16203
	2	1060	452	1512	5400
	3	1222	521	1742	6221
	4	795	340	1134	6517
50/50-blandningen (50 % myanit, 50 % cement)	1	2268	2268	4536	16200
	2	851	851	1702	10172
	3	567	567	1134	6703
Ren cement	1	-	1701	1701	9310

3.4 Provberedning

Som i de flesta typer av laboratorieprovning är provberedningen mer tidskrävande än själva provningsförfarandet. Framför allt gäller detta provning som inte omfattas av några standardiserade metoder, eftersom en teoretisk modell behöver anpassas till de förutsättningar som råder i laboratoriemiljö. Detta gäller främst vid metodutveckling, vilket urlakningsprovningen kan sägas ha varit. Vad som kan nämnas med anledning av ovanstående är att förberedelserna inför urlakningsprovningen var långt mer tidskrävande än för tryckhållfasthetsprovningen. Den generella uppfattningen är dock att tiden som läggs ned på förberedelser och provberedning betalas tillbaka vid analysen av resultaten från provningen, eftersom den förenklas desto fler parametrar man har kontroll över vid provningen.

3.4.1 Gjutformar

Det var tänkt att fyra provkroppar från respektive fillerbruksblandning skulle ingå i urlakningsförsöken, men vid gjutningen gav gjutformen vika för två av proverna tillhörande 70/30-blandningen.

3.4.1.1 Urlakningsprovning

För urlakningsprovningen krävdes det att bruket inneslöt i någon typ av form. Ett PVC-rör med innerdiametern 100 mm valdes för detta ändamål. En testprovning i urlakningsuppställningen gjordes av en provkropp för att undersöka om experimentuppställningen var rätt utformad. Det visade sig att vattengenomströmningen var anmärkningsvärt hög. Vid en uppsågning av provet observerades att större delen av det genomströmmande vattnet valde att strömma utmed kanten mellan bruket och PVC-röret och önskvärt var ett Darcy flöde, d.v.s. homogen vattenströmning genom provet. Det kan dock vara svårt att åstadkomma homogen strömning, eftersom differentiella flödesvägar lätt bildas pga. att vatten söker sig till de materialsvaga områdena

Valmöjligheterna för att lösa problemet med att vattnet valde att strömma i de materialsvaga områdena var dock begränsade, eftersom vald experimentuppställning var utformad för att bruket skulle provas i ett cylindriskt rör. För att minimera vattenströmningen längs PVC-rörets kant provade man att lägga strängar av bentonitfogband längs insidan av röret. På så vis tvingades vattnet in mot mitten på de två nivåer där fogbandet var monterat. Bentonitlera har också den egenskapen att svälla flera gånger dess ursprungliga volym vid kontakt med vatten, vilket än mer skulle tvinga vattnet in mot mitten. Vid en test av en provkropp med bentonitsträngar framkom det att vattengenomströmningen var låg. Trots att problemet med stor vattenströmning längs kanten av provet var avhjälpst framkom det att denna lösning inte var lämpad för detta

ändamål. Bentonitleran kan medverka till att fillerbruket får förändrade egenskaper. Principen att lägga något på insidan av röret på flera nivåer för att tvinga in vattnet mot mitten verkade trots allt vara en lösning att arbeta vidare med. Viktigt var dock att hitta ett material som inte medverkar till några kemiska reaktioner och som i sig är åldersbeständigt. Inom marinbranschen är man i stort behov av material som fungerar i tuffa miljöer, vilket föranledde det slutliga valet av marin-tekniksilikon som används för tätning i konstruktionsdelar i vatten eller i anslutning till. På insidan av PVC-röret lades i den övre halvan en sträng av Marin-tekniksilikon på tre nivåer enligt Figur 3-4.



Figur 3-4 Den slutliga lösningen med strängar av Marin-tekniksilikon.

Vid gjutningen av provkropparna för urlakningsförsöken förseddes botten på PVC-röret med en träplatta. För att inte bruket skulle rinna ut tätades fogen mellan röret och plattan med silikon. Under gjutningen av provkropparna med 70/30-blandningen höll inte två formars silikontätning helt tätt, vilket gjorde att vattnet i bruket rann ut. Det var tänkt att åtta provkroppar med fillerbruk skulle ingå i urlakningsförsöken, men pga.

detta haveri kom studien endast att omfattas av sex provkroppar; fyra från 50/50-blandningen och två från 70/30. Konsekvensen av detta är att resultaten från urlakningsprovningen för 70/30-blandningen har en mindre statistisk säkerhet än för 50/50-blandningen.

3.4.1.2 Tryckhållfasthetsprovning

Vid tryckhållfasthetsprovning används vanligtvis standardiserade former på provkropparna, till vilka det finns tillhörande gjutformer. Vid gjutning av provkroppar med fillerbruk och cement för tryckhållfasthetsprovning användes gjutformer med storleken 100·100·100 mm. Innan gjutning sprutades formolja på insidan av gjutformen för att underlätta avformning av provkropparna från gjutformen.

3.4.2 Blandningsförfarande

Myanit, cement och kallt kranvatten vatten vägdes upp utifrån ett givet recept. De blandades med en bormaskin försedd med en visp, även kallad propellerblandare. Därefter dispergerades bruket under cirka en minut för att undvika tillstånd med sammanklumpade partiklar i det gjutna bruket. Dispergering är extra viktigt vid användning av mycket finkorniga material, eftersom sammanklumpning av partiklar förändrar det finkorniga brukets injekteringsegenskaper.

Injekteringen simulerades genom att det dispergerade bruket hälldes ned i sanden och omrörningen gjordes med hjälp av en Hobartblandare. Sanden var redan innan uppmätt i Hobartblandarens bunke. När en homogen blandning med god porutfyllnad⁶ fåtts påbörjades gjutningen av provkropparna. PVC-rören fylldes halvvägs upp med bruk och stöttes tio gånger med en stav för att därefter fyllas helt. För att undvika ett gränsskikt mellan de två lagren stöttes det ytterligare tio gånger med en stav för att slutligen vibreras under ca. tio sekunder på ett vibreringsbord. Samma tillvägagångssätt med påfyllning i två omgångar tillämpades även för tryckhållfasthetsproverna.

Det finns en risk för vattenseparation om materialet vibreras under en längre stund, så därför utfördes vibreringen med största försiktighet. Speciellt gäller detta för bruk med högt vattencementtal.

3.4.3 Lagring

Det är inte enkelt att i laboratoriemiljö simulera de förhållanden som råder i en damm under det att injekteringsbruket hårdnar. Därmed tvingades man att acceptera att proverna lagrades under andra omgivningsförhållanden.

Proverna har lagrats under sammanlagt 28 dagar, vilket är den tid som anges i betongs provningsstandard (jmf. 2.5.2.1). Efter denna tidpunkt anser man att cementbaserade material genomgår en mycket liten hållfasthetsökning och förändring i porstruktur. Under de första 19 dagarna befann sig proverna i ett klimatrum med 20° C

⁶ God porutfyllnad innebär att bruket ska fylla ut sandens porsystem.

lufttemperatur och 65 % luftfuktighet. Provkropparna vattenmättades med hjälp av vakumbehandling, eftersom det under urlakningsprovningen är viktigt med ett homogent vattenflöde genom provkropparna för att kunna anta att ett vattenflöde enligt Darcys lag råder. Vid vattenmättad genom vakumbehandling förvaras proverna i vakuum och därmed ersätts luften i porsystemet med vakuum. När sedan provkropparna placeras i vattenbad kommer vatten lätt att kunna tränga in i porerna pga. att det uppstått ett undertryck i porsystemet i förhållande till atmosfärstrycket. Kuberna för tryckhållfasthetsprovning förvarades under de 28 dagarna i klimatrummet med 20° C lufttemperatur och 65 % luftfuktighet.

3.4.4 Preparering

Innan urlakningsprovningen påbörjades kapades de 29 cm långa provkropparna av i båda ändar med hjälp av en betongsåg. Avsågningen gjordes med låg hastighet och utan vattentillförsel pga. att fillerbruket lätt smulades sönder. Orsaken till avkapningen är att man önskar få en provkropp med så homogena egenskaper som möjligt, vilket då åstadkoms genom att avlägsna ändstyckena. Provkroppens sluthöjd blev 24 cm.

3.5 Urlakning

Livslängden hos ett material beror huvudsakligen av vilka omgivningsförhållanden det utsätts för. Den yttre påverkan på materialet gör att dess egenskaper försämras med tiden. För de flesta material sker det även en försämring av egenskaperna inifrån. I en laboratoriemiljö kan man inte fullständigt simulera den påverkan på materialet som finns i dess naturliga miljö. Vid undersökning av ett materials åldringsegenskaper i laboratorium är det därför bättre ur ett vetenskapligt hänseende att undersöka en eller några få faktorer som kan förändra ett materials egenskaper med tiden. På detta sätt fås inte den fulla förståelsen för hur ett materials egenskaper försämras med tiden, men däremot fås god kunskap om hur materialet påverkas av de faktorer som man väljer att undersöka. För en fullständig förståelse av ett materials åldringsprocesser krävs undersökning av materialet i fält, det vill säga i sin naturliga miljö, under en lång tidsperiod.

Det som ytterligare försvårar undersökningen av åldersbeständigheten är tidsfaktorn. Det är inte möjligt att i laboratoriemiljö testa ett material med avseende på de utvalda parametrarna till dess materialet uppnått den högst accepterade degraderingsnivån. Målet med all experimentell verksamhet är därför att finna en effektiv undersökningsmetod som återspeglar de verkliga mekanismerna så långt som möjligt. Ett angreppssätt för provning av åldersbeständigheten är att man försöker finna metoder i laboratoriet att accelerera förloppet för hur ett materials egenskaper försämras med tiden jämfört med hur det skulle ha degraderat i sin naturliga miljö. Svårigheten med en accelererande provning är att det är svårt att uttala sig om hur mycket snabbare åldringsprocesserna är än vid normala förhållanden. Det går således att göra en relativ bestämning av åldersbeständigheten genom att utsätta ett annat liknande material med mer kända åldringsegenskaper för samma accelererande åldringsförlopp.

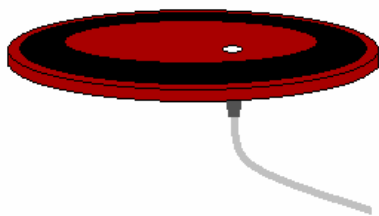
Den förändring i egenskaper som cementbaserade material utsatt för vattengenomströmning genomgår med åldern beror till största del av urlakning av kalciumjoner (se 2.4.1.1). Det finns inte enligt Tomas Ekström i dagsläget någon standardiserad metod för urlakningsprovning av cementbaserade material. Som sades i 2.4.1.2 har det inom ett doktorandprojekt på Lunds tekniska högskola, LTH, byggts upp en experimentuppställning för urlakningsprovning av betong. Vid uppstartsskedet av föreliggande examensarbete besöktes LTH för en demonstration av experimentuppställningen. Det diskuterades även om det fanns möjlighet att prova fillerbruk i experimentuppställningen. Det framkom dock ganska snart att provningen enklare skulle kunna genomföras i en experimentuppställning i Vattenfall Utvecklings lokaler. Experimentuppställningen i Lund hade aldrig använts kommersiellt, vilket försvårade den hantering och övervakning som var nödvändig under provningsperioden. Mot denna bakgrund beslöts det att en experimentuppställning för urlakningsprovning skulle byggas upp på Vattenfall Utvecklings betonglaboratorium i Älvkarleby.

3.5.1 Försöksuppställning

Den experimentuppställning som utvecklats på Vattenfall Utvecklings betonglaboratorium i Älvkarleby har samma grundutförande som den som finns på LTH. Huvudprincipen bygger på att provkroppar med det material som man vill undersöka urlakningen för utsätts för ett högt vattentryck på uppströmssidan, varpå vatten pressas igenom provkroppen. Det genomströmmande vattnet samlas sedan upp i en behållare för att möjliggöra undersökning av provets konduktivitet och det genomströmmande vattnets kemiska sammansättning.

Experimentuppställningen presenteras i Figur 3-5 och utgörs av fillerprovkroppar i PVC-rör, trycktank, tryckregulator och vattendunkar. Det fanns möjlighet att studera åtta provkroppar åt gången.

Provkropparna inneslöt mellan två stålskivor som är försedda med packningar på insidan, så som Figur 3-6 visar, för att se till att inget vatten sipprade ut mellan skivan och provet. På både uppströms- och nedströmsskivan ansluter slangar till små nipplar som i sin tur är i direktkontakt med provet.



Figur 3-6 Stålskiva med packning och slang kopplad till nippel.



Figur 3-5 Experimentuppställning på Betonglaboratoriet i Älvkarleby.

Det vatten som pressades genom proverna var satt under tryck med hjälp av en trycktank. Genom en tryckregulator och tryckventiler gick det att ställa in önskat vattentryck för systemet. I experimentuppställningen utsattes proverna för ett ensidigt konstant vattentryck motsvarande 20 meter vattenpelare (2 bar). Vattentrycket på provkroppen är ett realistiskt tryck som ett injekterat parti kan bli utsatt för i en normalsvensk fyllningsdamm [se 2.2.1].

Vattnet som trycks igenom proverna är avjoniserat och har ett pH-värde av ungefär sex, vilket betyder att vattnet är något surt. Ju renare (avsaknad av joner) och surare ett vatten är desto mer aggressivt mot cementbaserade material är det (se kap. 2.4). Att som i urlakningsförsöken använda sig av avjoniserat vatten kan vid förstone anses som en accelererande parameter vid provningen, eftersom de flesta vatten i naturen är något basiska. Det faktum som talar emot detta är att vattnet i de svenska norrländsälvarna snarare är mer sura än basiska [19].

3.5.2 Provning

För att kunna undersöka hur fillerbruket urlakas och hur detta påverkar storleken på vattengenomströmningen med tiden har det gjorts regelbundna mätningar av koncentrationen av enskilda joner samt konduktiviteten av det genomströmmande vattnet. Urlakningsprovningen var avsedd att få pågå under sju månader där det om möjligt gjordes en volymbestämning av det passerade vattnet vid samma tillfälle som det togs ett vattenprov för jonkoncentrationsbestämning.

Tryckhållfastheten har undersökts för de två fillerbruksblandningarna, cementbruket och urlakade provkroppar. Förutom detta har de urlakade proverna observerats okulärt för eventuellt kunna tyda strömningsvägar, brottanvisningar m.m.

3.5.2.1 Hydraulisk konduktivitet

Urlakningen av joner förändrar porsystemet hos fillerbruket pga. att joner förflyttar sig inom materialet eller att de helt försvinner med det genomströmmande vattnet. Vid en stor urlakning av joner går det att förvänta sig en ökning i hydraulisk konduktivitet av det vatten som strömmar igenom provkroppen (se 2.4.1.2).

Den hydrauliska konduktiviteten mättes genom att regelbundet göra en markering av vattennivån på de dunkar som samlade upp det vatten som passerade genom varje enskild provkropp. Vid volymbestämmningen av det passerade vattnet fylldes dunkarna upp med vatten till varje markering för att vägas. På så vis erhöles den ackumulerade vattenvolymen som vid beräkning av konduktivitetsutvecklingen bestämdes för varje observerat tidsintervall. Med ovanstående metod blir bestämningen av konduktiviteten inte gjord med största noggrannhet eftersom både volymsbestämningen och tidpunkten för när markeringen gjordes är behäftade med osäkerheter. Av denna anledning har det gjorts en felanalys vid bestämningen av konduktiviteten.

3.5.2.2 Urlakning av enskilda joner

Det har regelbundet samlats upp vatten i kemiskt beständiga platsflaskor för bestämning av koncentrationen av jonerna natrium, kalium och kalcium. I försöksplaneringen föreskrevs det att vattenprover till kemanalys skulle tas två gånger i veckan. Analysen av vattenproverna gjordes på Vattenfalls petroleumlaboratorium i Älvkarleby av en erfaren kemist vid två tillfällen med hjälp av en jonkromatografisk metod. Gränsvärdena för natrium, kalium och kalcium för den jonkromatografiska metoden redovisas i Tabell 3-5. En utförlig metodbeskrivning av bestämning av jonkoncentrationen återfinns i bilaga F.

Tabell 3-5

Gränsvärden i den jonkromatografiska metoden (IC)

Jon	Koncentration (mg/l)
Na ⁺	0,2
K ⁺	0,3
Mg ²⁺	0,2
Ca ²⁺	

3.6 Tryckhållfasthet

Tryckhållfastheten för fillerbruk är i sig inte intressant vid utvärdering av dess lämplighet vid injektering av en fyllningsdamms tätkärna. Som beskrivits i 2.2.1 är det i första hand skjuvhållfastheten som är avgörande för om fillerbruk ska kunna samverka med omgivande material på ett bra sätt. Anledningen till att tryckhållfastheten ändå

provas i denna studie är för att kunna undersöka hur väl den överensstämmer med de resultat som framkom vid tryckhållfasthetsprovningen 1999. Det som ytterligare gör tryckhållfasthetsprovning intressant är just det faktum att denna typ av hållfasthetsprovning är enkel och billig att utföra jämfört med skjuvförsök. Vid en eventuell fortsatt undersökning av fillerbruk kan det av denna anledning vara intressant att veta hur väl tryckhållfastheten och skjuvhållfastheten hos fillerbruk överensstämmer för att kunna effektivisera provningen av hållfasthetsegenskaperna.

3.6.1 Provning

Tryckhållfastheten provades i en enaxiell tryckpress på Betonglaboratoriet i Älvkarleby vid 28 dagars mognadstid. Förutom provkropparna av fillerbruk utfördes tryckhållfasthetsprovning på de urlakade provkropparna. Dessa kapades av i ändarna, varpå endast den mellersta provdelen tryckprovades av den anledning att man önskade ett så homogent prov som möjligt. Urlakningen av joner kan som nämndes i 2.4.1.2 ske i olika utsträckning i olika delar av en och samma provkropp.

I standarden för provning av cylindrar anges det att provkroppshöjden ska vara minst dubbla diametern. De urlakade provkropparna uppfyllde inte detta krav, vilket gör att den uppmätta tryckhållfastheten inte behöver vara helt rättvisande för materialet. Provkropparnas höjd var lika med minst deras diameter.

4 Resultat och analys

4.1 Inledning

Fillerbruk har provats med avseende på enaxiell tryckhållfasthet och de tidiga åldringsegenskaperna. Med tidiga åldringsegenskaper menas de urlakningsfenomen som kan förväntas uppträda under de fyra första månaderna efter det att injekteringen utförts. De resultat som presenteras nedan är de egenskaper som fillerbruk uppvisar under de förhållanden som rådde i laboratoriemiljö. Det går inte att anta att exakt samma mekanismer/förlopp uppträder i en fyllningsdamms tätkärna. Dock går det att anta att de resultat som presenteras nedan gäller i stort för hur en injektering med fillerbruk kommer att uppträda i en tätkärna.

4.2 Urlakning

De tidiga urlakningsegenskaperna hos fillerbruket har undersökts utifrån två aspekter; urlakning av joner och fillerbrukets hydrauliska konduktivitet. Redan efter någon dags provning uteslöts de två provkroppar som innehöll 70 % kalksten och 30 % cement ur försöksserien pga. att volymen vatten som passerade genom dem var ohanterligt stor. Åtgången på det avjoniserade vattnet i trycktanken var så stor att den behövde fyllas på flera gånger om dagen. Detta var en oväntad situation och skapade viss förvirring, vilket gjorde att det inte gjordes någon volymbestämning av det vatten som passerade igenom provkropparna. Det som skulle kunna förklara detta händelseförlopp är att denna blandning inte innehöll tillräckligt stor andel cement och därmed fick man ett material med svaga bindningar mellan partiklarna. Av denna anledning kunde troligen vattnet snabbt utbilda tydliga strömningsvägar och stora volymer vatten kunde därmed passera genom provkroppen.

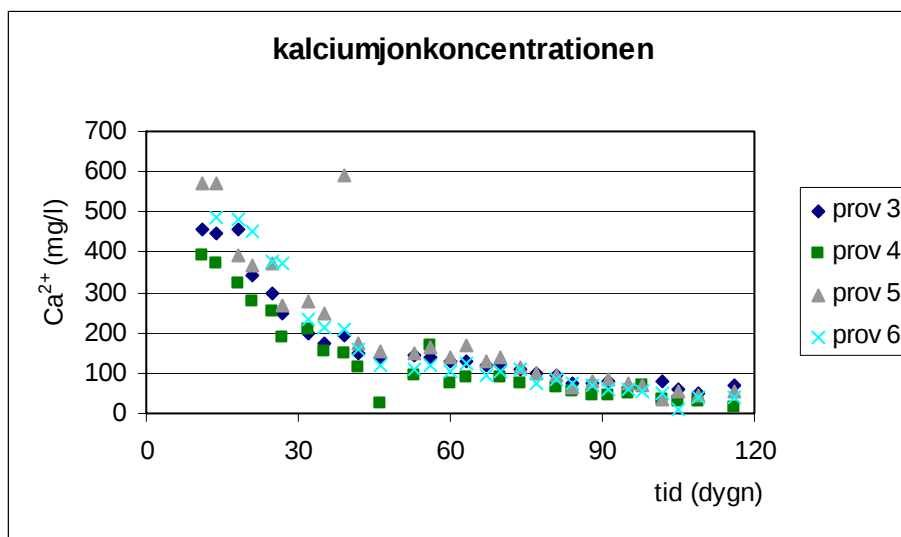
Urlakningsprovningen fungerade därefter utan några större komplikationer. Volymbestämning och uppsamling av vatten till kemanalys gjordes regelbundet, förutom under semestermånaden juli, då endast vattenprover togs till kemanalys. Provningen avslutades dock abrupt efter fyra månaders provning pga. av att laborationspersonal fann översvämning i det rum där experimentuppställningen stod uppställd. Orsaken till detta har inte gått att fastställa. Det skulle kunna bero på att experimentuppställningens trycksystem hade havererat, men när jag gjorde en kontroll av det fann jag inget som tydde på detta. En hypotes är att en eller flera av provkropparna började uppvisa kraftigt ökade vattenförande egenskaper. Jag beslöt att inte återuppta provningen pga. att provkropparna hade fått torka ut när avslutandet av provningen kom till min kännedom pga. av att uttorkade prover som utsätts för en vattengenomströmning kan ha förändrade material- och vattenförande egenskaper jämfört med dem som rådde vid det vattenmättade tillståndet innan uttorkning.

4.2.1 Kemanalys

Mängden urlakade joner studerades genom att kontinuerligt under den fyra månader långa provperioden kemiskt analysera det genomströmmande vattnet. I genomsnitt togs det ett vattenprov för kemanalys av jonerna natrium, kalium och kalcium var fjärde dag.

Koncentrationen av natrium och kalium har knappt varit mätbar i den undersökningsmetod som använts vid analys av jonkoncentrationen (gränsvärdena för den jonkromatografiska metoden redovisas i kap. 3.5.2.2). (se bilaga F). Förklaringen till de låga koncentrationerna ligger troligen i att det första vattenprovet för kemanalys togs elva dagar efter igångsättningen av urlakningsförsöken och som beskrevs i 2.4.1.1 urlakas jonerna natrium och kalium redan vid den första passerade porvolymen⁷ för att redan efter några porvolymmer knappt vara mätbara. Även om kemanalys gjorts vid uppstart av urlakningsförsöken finns det anledning att tro att koncentrationerna av natrium och kalium trots det hade varit låga. Under de dagar proverna vattenmätades förvarades de i ett kar med avjoniserat vatten i vilken urlakningsprocessen antas ha initierats pga. en koncentrationsgradient mellan fillerbruk och vattnet. Härmed går det inte att få den fulla kunskapen av fillerbruks allra första urlakning. Denna kunskap är dock av mindre intresse vid undersökning av urlakningsbeständigheten. Som beskrevs i 2.4.1.1 är det uteslutande urlakningen av kalciumjoner som inverkar på fillerbruks åldringsegenskaper.

Detta innebär att tyngdpunkten för kemanalysen ligger på mätvärdesbehandling av kalciumjonkoncentrationens förändring med tiden. I Figur 4-1 illustreras kalciumjonkoncentrationens utveckling med tiden. Det finns en gemensam trend för alla fyra provkroppar; kalciumjonkoncentrationen är initieellt hög för att sedan avta till låga nivåer med undantag för några få mätvärden som avviker från trendkurvan.



Figur 4-1 Kalciumjonkoncentrationen för provkropparna innehållande lika delar cement och kalksten som funktion av den knappt fyra månader långa provperioden.

⁷ Med porvolym avses den sammanlagda volymen av porsystemet.

Det är inte nödvändigt att helt förstå vad som kan vara orsaken till tillfälligt höga respektive låga kalciumjonkoncentrationer så länge som de inte inverkar på urlakningstrenderna. Det är tydligt att de avvikande värdena inte haft en sådan påverkan, eftersom de provkroppar som har avvikande värden följer samma trend som de andra provkropparna efter att det avvikande värdet uppträtt. En förklaring till toppar i kalciumjonkoncentrationen är att en plugg av vatten kan ha bildats inne i provkroppen pga. att det genomströmmande vattnet valt en annan strömningsväg. Därmed har vatten isolerats under en tid och på så vis fått en hög koncentration av kalcium. När det genomströmmande vattnet ytterligare tar en annan strömningsväg kan vattenpluggen släppa, vilket resulterar i en hög kalciumkoncentration i det uppsamlade vattnet för kemanalys. Vattnet som analyserades m.a.p. jonkoncentration uppsamlades vid varje observationstillfälle under en dag. För att undvika avvikande urlakningsfenomen så som tillfälligt höga/låga koncentrationer skulle det ha varit fördelaktigt att samla upp vatten under en längre tidsperiod.

4.2.2 Hydraulisk konduktivitet

Urlakningen av joner kan som beskrivits i kap 2.4 medföra en förändring i porsystemet, vilket efter tillräckligt stor urlakning kan observeras genom ökade vattenförande egenskaper hos fillerbruket. Genom att studera den hydrauliska konduktiviteten för en provkropp under en längre tidsperiod kan man undersöka om urlakningsprocesserna har haft en sådan inverkan på materialet.

4.2.2.1 Felanalys

Konduktiviteten beror av ett flertal parametrar som i olika stor utsträckning är behäftade med ett fel. Med hjälp av en felanalys utreder man hur stort det enskilda felet är hos respektive parameter för att därefter beräkna hur dessa sammantaget medverkar till ett fel i konduktiviteten. [26] Den utförda felanalysen har gjorts genom en betraktelse av hur mycket konduktiviteten maximalt kan avvika uppåt och nedåt för varje enskilt observationstillfälle. Konduktiviteten uttrycks av Ekv. 4-1, vilken närmare beskrivs i 2.2.

$$k = q \cdot \frac{L}{\Delta p} \cdot \frac{1}{A_{tot}} \quad \text{Ekv. 4-1}$$

I Tabell 4-1 redovisas antagandena för den utförda felanalysen av konduktiviteten, där index *best* betecknar det uppmätta värdet. Vattenflödet, q , bestäms genom passerad vattenvolym, V , per tidsenhet, t , vilka båda är variabler i urlakningsförsöken. De mäts vid varje observationstillfälle.

Tabell 4-1

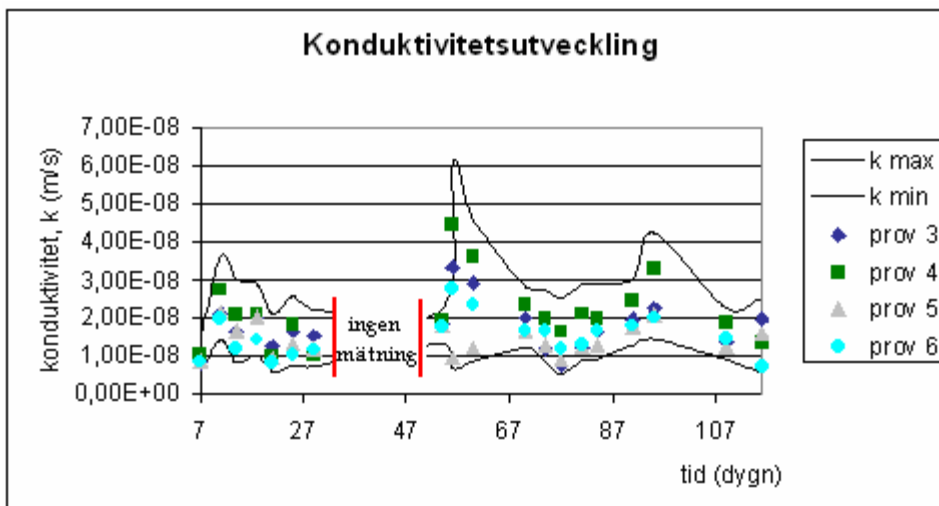
Antagna fel hos de ingående storheterna vid beräkning av konduktiviteten enligt Ekv. 4-1.

$L = L_{best} \pm 0,005 \text{ m}$ $\Delta p = \Delta p_{best} \pm 1,02 \text{.mvp}(= 0,1 \text{ bar})$ $A_{tot} = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (\text{m}^2)$ $d = d_{best} \pm 0,002 \text{ m}$ $q = \frac{V}{t} \quad (\text{m}^3/\text{s})$ $V = V_{best} \pm 0,1 \text{ l} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ $t = t_{best} \pm 3600 \text{ s}$	$L_{best} = 0,24 \text{ m}$ $\Delta p_{best} = 20,39 \text{.mvp}(= 2 \text{ bar})$ $d_{best} = 0,01 \text{ m}$
---	--

Diametern på provkroppen, d , är den inre diametern på PVC-röret. Felet i vattenflödet beror både på ett fel i volymbestämmning och observationstid. Vid varje observationstillfälle gjordes en markering för vattennivån på uppsamlingsdunken för passerat vatten. Vid urlakningsprovningens avslut uppmättes passerad vattenvolym genom att fylla dunken med vatten till respektive markering för att därefter väga innehållet. Volymbestämmningen innebär således ett fel i att vattennivån vid återuppfyllningen inte behöver överensstämja med vattennivån vid observationstidpunkten pga. att markeringen är ungefärlig och att vattennivån inte nödvändigtvis behöver överensstämja med markeringen vid återuppfyllningen. Dock är detta fel förhållandevis litet med hänsyn till de vattenvolymer som passerade mellan varje observationstillfälle. Som tidigare poängterats beror även flödesbestämningen av ett tidsfel. Tidpunkten för volymbestämmningen är endast känd till datum, vilket kan orsaka ett mycket stort tidsfel. Vad som dock tyder på att så inte är fallet är att volymmarkeringen på respektive provkropps dunk gjordes samma dag som det togs ett vattenprov för kemanalys och det krävdes en hel arbetsdag för att samla upp en tillräcklig vattenvolym till kemanalys. Mot bakgrund av detta kan det antas att tiden inte varierade mer än en halvtimme för den tidpunkt då volymmarkeringen gjordes, vilket som mest kan innebära ett fel på en timme mellan två på varandra följande observationstillfällen

4.2.2.2 Hydraulisk konduktivitetsutveckling

Utifrån Figur 4-2 illustreras den hydrauliska konduktivitetsutvecklingen för provkropparna 3, 4, 5 och 6. De enskilda markeringarna är den uppmätta hydrauliska konduktiviteten för respektive provkropp och de heldragna linjerna representerar de uppskattade extremvärdena (se felanalys 4.2.2.1).



Figur 4-2 Konduktivitetsutvecklingen för den fyra månader långa provperioden. Varje observerad tidpunkt är behäftad med ett fel, vilket illustreras med hjälp av de kontinuerliga kurvorna.

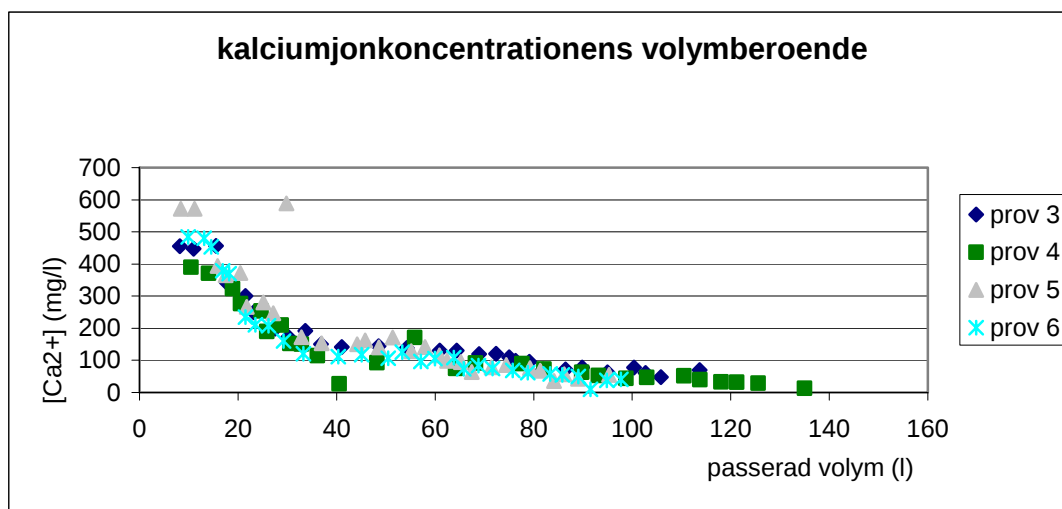
Det går inte att se att urlakningen haft någon inverkan på konduktiviteten utifrån den fyra månader långa volymbestämningen. Genom att betrakta de beräknande extremvärdena ($k_{\min}$ och $k_{\max}$ i Figur 4-2) går det att konstatera att konduktiviteten i flera fall är behäftad med ett stort fel och vid felanalysen framkom det att tidsfelet är det dominerande. Detta visar på att hanteringen av urlakningsprovningen därför behöver förbättras. Vad som likväl talar för att inte problematisera de stora felen i bestämning av konduktiviteten är att den med hänsyn till extremvärdena ligger inom det konduktivitetsintervall som är önskvärt för en fyllningsdamms tätkärna, vilket är $3 \cdot 10^{-7}$ till $3 \cdot 10^{-9}$ m/s. (i bilaga D presenteras all mätdata och tillhörande databehandling). Den övre och undre gränsen för konduktiviteten är missvisande för mätpunkterna direkt efter mätuppehållet i juli. Detta ses framförallt på att mätpunkterna ligger på samma linje som det övre konduktivitetsstrecket. Detta är en följd av interpolation mellan mätvärdena och denna blir missvisande eftersom det inte gjorts någon mätning i juli. Värt är dock att poängtera är att toppen i $k_{\max}$ är representativ för mätningen och beror på att tidsintervallet mellan två på varandra följande observationer endast var två dygn, och därmed blir tidsfelet än mer dominerande än för observationsintervall som är längre.

Som tidigare beskrivits avslutades urlakningsprovningen pga. av en översvämning och orsaken till detta är fortfarande inte klarlagd. Min hypotes till detta är att någon eller några av provkropparna fick en kraftig förhöjd vattengenomströmning. Hypotesen stöds dock inte av den hydrauliska konduktivitmätningen, vilket kan förklaras med att tidsintervallet mellan de två sista observationstillfällena var sju dagar. Detta tidsintervall är för långt för att kunna se snabba förändringar i konduktiviteten. Dessutom gjordes ingen volymbestämning under veckan innan provningsavslut. Det går att förklara översvämningen med Hagen-Poiseuilles lag (se 2.4.1.2) under antagandet att den berodde på en snabb ökning av de vattenförande egenskaperna hos fillerbruket. Lagen säger att redan vid bildandet av små flödeskanaler blir det en kraftig ökning av vattengenomströmningen. Vad som skulle kunna stödja detta är den observation jag

gjort av vattenvolymen som uppsamlades i flaskorna för kemanalys. Vattenvolym för provkropp fyra var under den sista observationsveckan cirka en liter och tidigare vid uppsamling av provvatten var volymen endast några deciliter. De andra provkropparna uppvisade inte detta fenomen. Vid samtliga tillfällen för uppsamling av vatten till kemanalys ansamlades vatten som passerade genom provkropparna i provflaskorna under en arbetsdag.

4.2.3 Kalciumjonkoncentration – hydraulisk konduktivitet

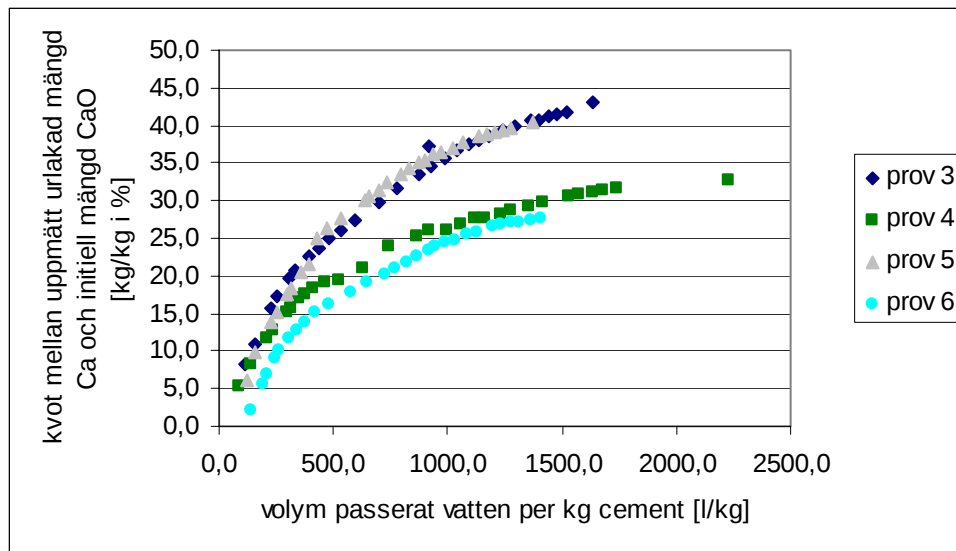
En annan metod att illustrera urlakningsförloppet av joner är att relatera jonkoncentrationen till den sammanlagda volym vatten som passerat igenom provkroppen för de tidpunkter som vatten uppsamlats till kemanalys. I Figur 4-3 illustreras förhållandet mellan kalciumjonkoncentrationen och den passerade volymen vatten för de fyra provkropparna. Trenden är tydlig; för de cirka 40 första passerade litrarna avtar urlakningshastigheten snabbt för att sedan minska långsamt. Vad som också går att utläsa ur Figur 4-3 är att provkropp nummer fyra har mycket låga koncentrationer av kalciumjoner vid urlakningsförsökens avslutande. Värt att uppmärksamma är att provkropp fyra även har störst totalvolym passerat vatten bland de studerade provkropparna. I Figur 4-1 gick det inte att observera detta fenomen, vilket gör att det kan vara missvisande att enbart undersöka kalciumjonkoncentrationens tidsberoende.



Figur 4-3 illustrerar kalciumjonkoncentrationen förhållande till total passerad vattenvolym vid de olika observationstillfällena.

Det går att göra en grov uppskattning av fillerbruks urlakningsegenskaper utanför den undersökta provperioden genom beräkning av hur stor den urlakade mängden kalcium är i förhållande till mängden bränd kalk, CaO, i cementet i en provkropp och relatera detta till volymen vatten som passerat per kilo cement. Denna beräkning förutsätter att de urlakade kalciumjonerna härrör från de hydrationsprodukter i cement som innehåller kalcium (se 2.4.1.1). I Figur 4-4 illustreras detta samband för respektive provkropp.

Intressant är att det finns två trender; en för provkropparna 3 och 5 samt en för 4 och 6. Fördelen med att illustrera kalciumjonkoncentrationen som i Figur 4-4 är att sambandet inte är beroende av tiden och därmed fås ett resultat som inte beror av det relativt stora tidsfelet som mätningen av konduktiviteten innebar.



Figur 4-4 Den procentuella urlakningen av kalciumjoner i förhållande till mängden CaO i cement. Beräkningen har gjorts utifrån den mängd inblandat cement och det faktum att UF-12 cement innehåller 64,7 % CaO.

Det som talar för att den procentuella andelen urlakat kalcium inte är helt representativ för urlakningsförloppet är att det vid en okulär besiktning av provkropparna tydligt gick att iaktta att vattenströmningen i fillerbruket inte varit homogen. I Figur 4-5 visas ett fotografi av en itusågad provkropp, i vilken det går att se nyansskiftningar i materialet. Man kan anta att urlakningen varit större i de gulfärgade områdena av den anledningen att kalk är vit till färgen. Det är svårt att veta hur stor del av det genomströmmade vattnet som valt en strömningsväg enligt de gula områdena och hur stor volym som faktiskt passerat genom resten av provkroppen. Dock har vatten den egenskapen att den väljer att strömma i det område där det är lättast, d.v.s. i den svagaste länken. Detta innebär att när väl vattnet utbildat en strömningsväg så ändras inte denna naturligt, utan vad som krävs är i så fall någon typ av yttre påverkan.



Figur 4-5 Här visas den övre delen av en itusågad provkropp. Det går att se en tydlig gulaktig nyansskiftning längs med kanterna, vilket kan tyda på att det passerade vattnet strömmat just i dessa partier.

Håligheterna som finns på provkroppens sidor kommer från att tätningsmassan på PVC-rörets insida satt just här.

4.3 Mekaniska egenskaper

De mekaniska egenskaperna hos fillerbruket som har undersökts vid provning är enaxiell tryckhållfasthet för färska (28 dagar) och urlakade prover. Även resultaten som framkom vid tryck- och skjuvhållfasthetsprovningen i det föregående projektet redovisas och analyseras i detta avsnitt.

De urlakade provkropparna som undersökts tillhör blandningen med lika delar cement och kalksten pga. att provkropparna med en större andel kalksten i ett tidigt skede uteslöts ur försöksserien. Dessa ansågs inte intressanta att vidare undersöka, eftersom dessa provers vattengenomströmning var mycket hög.

4.3.1 Tryckhållfasthet

Den enaxiella tryckhållfastheten provades för såväl 28 dagar gamla prover som urlakade. Vardera fyra stycken prover från de två fillerbruksblandningarna och från det rena cementbruket provades med avseende på de färska hållfasthetsegenskaperna (28 dagar). De fyra urlakade provkropparnas hållfasthetsegenskaper undersöktes också, för att kunna göra en jämförelse med motsvarande färska hållfasthetsegenskaper. I Tabell 4-2 redovisas den uppmätta tryckhållfastheten för de färska proverna både från den

provning som gjordes i föreliggande projekt och från de försök som utfördes på fillerbruk 1999. Det finns en tydlig skillnad i tryckhållfasthet mellan de olika blandningarna, vilket går att förklara utifrån andelen cement. Det är cementinblandningen som ger hållfastheten hos bruket och följaktligen blir hållfastheten större vid en större andel inblandat cement, vilket även kan utläsas ur Tabell 4-2. Tryckhållfastheten skiljer sig något mellan de två försöksomgångarna, vilket kan bero på att kuberna förvarats under olika förhållanden. I studien 1999 var proverna vattenmättade vid provning till skillnad från proverna i föreliggande studie

Tabell 4-2

Tryckhållfasthet, σ (MPa), för färska prover

Tidpunkt	Blandning 50/50	Blandning 70/30	Rent cementbruk
2005	6,8	2,4	16,2
	7,3	2,7	16,0
	6,9	2,6	16,3
	6,6	2,3	15,9
<i>Medel, σ</i>	6,9	2,5	16,1
1999	8,0	2,3	
	6,8	2,1	
	7,3	1,9	
<i>Medel, σ</i>	7,4	2,1	

Tryckhållfastheten för urlakade prover redovisas i Tabell 4-3, i vilken man ser stora skillnader mellan de olika provkropparna. Det som skulle kunna förklara att kub nummer ett har en kraftigt minskad tryckhållfasthet jämfört med de tre andra provkropparna är att det observerades en antydning till brottlinje hos provkroppen redan innan tryckhållfasthetsprovningen påbörjats. Vid en jämförelse mellan tryckhållfastheten för urlakade prover och färska går det att se att medelvärdet av tryckhållfastheten för urlakade prover är högre än för färska (kub nummer ett exkluderad). Detta fenomen går att förklara utifrån flera teorier. Det man med säkerhet vet är att ju högre hydratiseringsgrad desto högre hållfasthet, men eftersom fillerbruk har en hög porositet går det att anta att en hållfasthetshöjning av denna anledning är mycket liten. Det är också värt att påtala i detta sammanhang att de urlakade proverna inte provades under de förhållanden som är lämpliga vid tryckhållfasthetsförsök (se 2.5.2.1). Därmed behöver inte den uppmätta förhöjningen av hållfastheten hos de urlakade proverna jämfört med de färska proverna vara helt korrekt.

Tabell 4-3

Tryckhållfasthet, σ (MPa), för urlakade prover

Kub nr.	Blandning 50/50	
1	3,9	
2	7,9	
3	7,6	
4	9,0	
Medel, σ	7,1 (inkl kub 1)	8,2 (exkl. kub 1)

Vid en okulärbesiktning av urlakade provkroppar var det tydligt att fillerbruket var mer poröst på uppströms- än på nedströmssidan. Den uppmätta förhöjningen i hållfasthet skulle därför kunna tänkas bero på att vissa delar av ett prov har blivit mer anrikat än urlakat på joner. Jag tror dock inte att så varit fallet, eftersom det förutsätter att det genomströmmande vattnet skulle ha varit mättat på joner och därmed en utfällning skett. Det som är mer troligt är att urlakningen har varit större i den övre delen av provkroppen pga. att det genomströmmande vattnet varit renare där. För att så långt som möjligt undvika ett prov som var urlakat i olika stor omfattning togs den mellersta delen av den urlakade provkroppen ut för tryckhållfasthetsprovning.

I följande avsnitt analyseras de resultat som framkom vid skjuvförsöken 1999.

Figur 4-6

Resultat skjuvförsök

Blandning	Celltryck (kPa)	Skjuvhållfasthet (MPa)
70/30	50	4,5
	100	4,4
	200	1,5
50/50	50	2
	100	1,2
	200	4,7

Skjuvhållfastheten är hög för båda blandningarna jämfört med den som morän har och det är önskvärt med en låg skjuvhållfasthet hos fillerbruk för att det ska kunna omlagras vid dammrörelser. Eftersom morän och fillerbruk har olika geotekniska egenskaper så går det inte enbart att se till de uppmätta skjuvhållfastheterna för att kunna avgöra hur

väl de samverkar (jmf kap. 2.5.2.). Faktorer som inspänningsgrad och normaltryck kommer också att påverka skjuvhållfastheten.

5 Diskussion

Fillerbruks egenskaper har undersökts i tre studier som alla har utförts av olika personer. Fördelen med att fillerbruks lämplighet har undersökts av ett flertal personer är att stor kunskap och många infallsvinklar har kunnat legat till grund för utformningen av laboratieförsöken.

Huvudfokus i studien har varit undersökning av fillerbruks urlakningsegenskaper. Tidsperioden för vilken urlakningsförsöken fick pågå var fyra månader, vilket gör att det endast går att spekulera i långtidsegenskaperna. Trots att studien av fillerbruks urlakning endast omfattade fyra provkroppar så har resultaten varit entydiga, vilket gjort att tillförlitligheten hos slutsatserna är förhållandevis god. Den största osäkerhetsfaktorn i urlakningsförsöken är att det är svårt att veta hur väl lösningen med silikonsträngar på det omslutande PVC-rörets insida har avhjälpt en differentierad vattenströmning. Vid en okulärbesiktning av itusågade urlakade provkroppar gick det att observera en nyansskiftning mellan provets inre och yttre delar. Detta skulle kunna förklaras med att vattengenomströmningen varit större i de yttre delarna och därmed hade detta material urlakats på mer kalk än de inre delarna. Denna teori skulle kunna stödjas av det faktum att urlakningsprovningen abrupt avslutades pga. en mindre översvämning, vilken i sig skulle kunna vara orsakad av att åtminstone en av provkropparna hade havererat d.v.s. fått en kraftigt förhöjd hydraulisk konduktivitet. Detta förlopp måste dock ha varit kraftigt accelererat, eftersom det i den kontinuerliga undersökningen av den hydrauliska konduktiviteten inte gått att se några som helst tendenser till att fillerbruk fått ökade vattenförande egenskaper med tiden. En snabb konduktivitetsökning skulle kunna förklaras med att specifika flödeskanaler bildats, eftersom det redan vid uppkomsten av små flödeskanaler blir en kraftig ökning i vattenflödet genom provkroppen.

Alla fyra provkroppar innehållande lika delar cement och kalksten uppvisade samma trend för kalciumjonkoncentrationens tidsberoende, vilket därmed skulle antyda på att strömningskanalerna liknade varandra för de observerade provkropparna. Detta skulle i så fall betyda att samtliga provkroppar vid en fortsatt urlakningsprovning ganska snart skulle ha uppvisat en ökning i vattenförande egenskaper. Vad som ytterligare talar för att fillerbruket hade fått en ökad porositet med efterföljande ökning av vattengenomströmningen är att kalciumjonkoncentrationen var mycket låg för alla provkroppar i slutet av provningen relativt den koncentration som uppmättes i början av provningen. Anledningen till att inte urlakningsprovningen återupptogs efter dess oplanerade avslut var att provkropparna torkat ut, vilket medför förändrad porstruktur och därmed andra vattenförande egenskaper hos materialet.

I en injekterad tätjärna skulle samma förlopp med ett differentierat flöde och urlakning kunna vara aktuellt i gränsen till anliggande konstruktioner eller till material med annan hydraulisk konduktivitet. Tack vare att fillerbruk har en mycket låg skjuvhållfasthet jämfört med moränen i en fyllningsdamms tätjärna finns det möjlighet för dessa partier att omlagras och därmed möjliggörs en återfyllning av de specifika flödeskanalerna. Det är dock svårare att uttala sig om huruvida ett kraftigt urlakat fillerbruk uppfyller uppställda krav på permeabilitet. Vad som ändå talar för att ett urlakat fillerbruk skulle kunna fungera väl i en tätjärna är den observation som Per Hansson gjorde i sina

injekteringsförsök där injekterad kalksten bildade en lagring motsvarande den som åstadkoms vid mekanisk packning. Hur fillerbruk beter sig i sin tilltänkta miljö måste dock undersökas närmare, men ovanstående resonemang kan vid utformandet av sådana studier tas i beaktande.

Föreliggande diskussion bygger på att det var någon eller några av provkropparna i provuppsättningen som fick en kraftigt förhöjd vattengenomströmning pga. bildandet av tydliga strömningskanaler. Utifrån detta antagande har urlakningsprovningen varit kraftigt accelererad. Vid en homogen strömning skulle en ökning av vattengenomströmningen ta avsevärt längre tid och därmed är det svårt att uttala sig om fillerbruks åldersbeständighet. Även bestämningen av den procentuella andelen urlakat kalcium som funktion av passerad vattenvolym per kilo cement är troligen behäftad med ett visst fel eftersom beräkningarna bygger på att strömningen genom provkropparna varit homogen. Om nu så inte var fallet går det endast att undersöka sambandet mellan den procentuella andelen urlakat kalcium och den passerade vattenvolymen. Detta kan i sig vara intressant, men sambandet gäller bara under den förutsättning att konduktiviteten är konstant lika med den som uppmättes under provningen.

6 Slutsatser

De slutsatser som följer om fillerbruks lämplighet antas i stort gälla för en injektering med fillerbruk i en tåtkärna, men de specifika urlakningsvärdena som presenteras i kapitlet resultat och analys gäller endast för provkroppar med samma egenskaper som de provkroppar som undersöktes. Dessa resultat ska i ett större sammanhang endast undersökas med avseende på trendutveckling.

De slutsatser som presenteras nedan består av två spår:

1. Fillerbruks mekaniska egenskaper samt den tidiga urlakningsbeständigheten.
2. Förslag till fortsatt arbete inom området för fillerbruk samt belysa de kunskapsluckor som finns inom de områden som jag behandlat i litteraturstudien.

Det sistnämnda kan uppfattas ligga utanför studiens syfte, men brist på publicerad litteratur har inom vissa områden varit ett problem under arbetet med litteraturstudien. Jag kommer att redogöra för dessa områden i syfte att uppmärksamma människor inom branschen på vilken typ av forskning och litteratur som skulle vara önskvärd.

1. Följande slutsatser kan man dra om fillerbruks mekaniska egenskaper samt den tidiga urlakningsbeständigheten:

Konduktivitet

Blandningen med den högre andelen cement (50 % cement 50 % kalksten) har en konduktivitet som är lämplig för en fyllningsdamms tåtkärna, medan blandningen innehållande 30 % cement och 70 % kalksten har en för hög konduktivitet. Denna slutsats baseras på att alla de undersökta provkropparna med 70/30-blandningen uppvisade hög hydraulisk konduktivitet under den korta tidsperioden de provades.

Urlakning

Urlakningen av kalciumjoner kan förväntas vara initiiellt hög, men avtar ganska snabbt till låga nivåer. Förutsatt att dammkroppen har konstant konduktivitet, råder ett urlakningsförlopp där urlakningshastigheten efter en viss tid planar ut. Tiden för hur länge en injektering med fillerbruk kommer att uppfylla uppställda krav på t.ex. täthet är svårt att uttala sig om pga. att en fyra månader lång provperiod inte är tillräcklig för att kunna se långtidstendenser. Provningsen kan dock antas vara kraftigt accelererad utifrån det antagandet att tydliga flödeskanaler bildats. Den antagna ökningen av vattengenomströmningen uppträdde under dessa omständigheter i ett långt tidigare stadium än om vattenströmningen varit homogen.

Hållfasthet

Tryckhållfastheten sjunker kraftigt vid inblandning av kalksten. Det har det inte gått att se någon korrelation mellan fillerbruks tryck- och skjuvhållfasthet pga. att studien omfattade för få provkroppar. Den uppmätta skjuvhållfastheten varierar mellan 1.2 och 4.7 MPa, vilken är hög jämfört med den skjuvhållfasthet som morän har (cirka 100 kPa). Vid eventuella dammrörelser finns därmed en risk att ett injekterat parti har svårt

att omlagras och därmed skulle nya läckvägar kunna bildas. Hur materialen samverkar behöver dock undersökas närmare. Rena skjuvhållfasthetsvärden kan vara missvisande för hur ett injekterat parti omlagras vid dammrörelser, eftersom morän och fillerbruk har stora skillnader i geotekniska egenskaper och därmed behöver inte fillerbruket nödvändigtvis samverka dåligt med moränen i en tät kärna.

Utifrån ovanstående parametrar kan man dra slutsatsen att ett fillerbruk med lika delar cement och kalksten skulle kunna vara ett lämpligt injekteringsmedel i en fyllningsdamms tät kärna, men det krävs ytterligare underlag för att kunna uttala sig om dess lämplighet i en verklig konstruktion.

2. Förslag till fortsatt forskning/arbete

Inom området för fillerbruk

Utvärdering av material i laboratoriemiljö innebär alltid att man tvingas förenkla de faktorer som kan tänkas inverka på materialet i dess naturliga miljö. Av denna anledning är det rekommendabelt att undersöka fillerbruket i den miljö som råder i en dammkropp genom att göra storskaligt injekteringsförsök för att därefter t.ex. utvärdera den injekterade jordens skjuvhållfasthet och hydrauliska konduktivitetsutveckling med tiden.

Jag anser dock att det skulle vara lämpligt att göra ytterligare laboratorieförsök på fillerbruk. I urlakningsprovningsen var provuppsättningen förhållandevis liten för att få en statistisk säkerhet i resultaten. Vid en eventuell uppföljning av fillerbruks urlakningsegenskaper bör ett större antal prover undersökas. Det bör även göras en optimering av fillerbruks recept, eftersom 50/50- blandningen fungerade väl och 70/30- blandningen inte gjorde det och därmed vet man inte vid vilket kalksten-cementförhållande som man fortfarande får en fungerande blandning.

Injekteringsmetoder och material

Tillgänglig litteratur inom hur man går till väga vid injektering och vilka material som är lämpliga under olika förutsättningar är i de flesta fall av en beskrivning av specifika injekteringsexempel. Det som saknas är generella beskrivningar/metoder av hur en damm som ska repareras vid konstaterad nedsatt funktion. Ofta väljer man ett tillvägagångssätt vid en dammreparation som visat sig fungera på andra dammar, vilket gör att en t.ex. injekteringsförfarandet snarare baseras på erfarenhet från tidigare injekteringar och inte på en faktisk bedömning av de specifika förhållandena. Forskning inom t.ex. reparationsmetoder för fyllningsdammar skulle kunna förbättra kunskapsläget genom att injekteringsfall sammanställs och utvärderas med avseende på använt injekteringsmaterial, egenskaper hos den injekterade jorden, uppnådd funktion hos dammkroppen m.m.

Utvärdering av injekterad jords skjuvhållfasthet

Det som framkommit i beskrivningen av jords skjuvningssegenskaper och bestämningen av dessa är att det inte är helt enkelt att göra skjuvförsök i laboratorium som efterliknar förhållandena i verkliga livet. Bristen ligger också i att litteratur inom området för skjuvningsprovning av jord antingen ger en beskrivning i mycket generella ordalag eller

är riktad till erfarna geotekniker. Följaktligen är det svårt för t.ex. beställare som i sig har en teknisk bakgrund, men som inte innehar de specifika kunskaperna att inhämta geoteknisk information på en hög teknisk nivå som är begriplig.

Vad som än mer råder kunskapsbrist inom är under vilka förhållanden som injekterad jord ska provas under. Eftersom denna typ av jordmaterial inte liknar någon av de naturliga jordarterna vet man inte vilka egenskaper hos jorden man kan vänta sig, vilket försvårar valet av t.ex. belastningshastighet och dräneringsförhållanden. Varje injekteringssituation är unik, vilket gör att det skulle underlätta om det fanns riktlinjer över hur olika typer av jordar bör skjuvprovas. I dagsläget finns det inte tillräckligt underlag för att kunna ta fram sådana typer av riktlinjer, men genom studier av injekterad jord så skulle det kunna vara genomförbart.

7 Referenser

1. Elforsk (2005). *Anläggningskostnadsindex* [www]. Hämtat från <http://www.elforsk.se/vatten/vat-anl_index.html>. Senast källan kontrollerades: 6 april 2005.
2. Sjöström, Ö. (1999). *Förstudie, reparation av jorrdammar genom injektering*. Stockholm: Elforsk. (Elforsk-rapport 99:48)
3. Göthlin, C. (2003). *Förstudie, silikatinjekteringars beständighet*. Ännu ej publicerad av Elforsk
4. *Kursmaterial i Vattenbyggnad* (gavs för väg- och vattenbyggare på KTH) (2003). Kursavsnitt fyllningsdammar. Stockholm 2003
5. Vattenfall (1988). *Jord- och stenfyllningsdammar*. Stockholm: Happy Printing AB. ISBN 91-7186-271-4
6. Ekström T. (2003). *Leaching of concrete, The leaching process and its effects*. Lund Institute of technology, Division of Building Materials. ISBN 91-628-5720-7
7. Häggström S. (1988). *Hydraulik för V-teknologer*. 3: e upplagan. Göteborg. Institutionen för vattenbyggnad
8. Cernica J. N. (1995). *Geotechnical Engineering, Soil Mechanics*. United states of America. John Wiley & Sons, Inc. ISBN 0-471-30884-6
9. *Kurslitteratur i Jord- och bergmekanik, grundkurs* (1986). Kompendium. Kungl. Tekniska Högskolan, Institutionen för jord- och bergmekanik.
10. SGF (2005). *Kommittéer - laboratorie – verksamhet* [www]. Hämtat från <<http://www.sgf.net/home/page.asp?sid=862&mid=2&PageId=11848>>. Senast källan kontrollerades: 6 april 2005
11. Kjaernsli, B. *Hydraulisk uppspräckning, norska erfarenheter*. Temamöte i Storlien 18-19 april, 1991.
12. Nilsson, Å. Et Norstedt, U. *Evaluation of Ageing Processes in two Swedish Dams*. Q.65, R.2, ICOLD Vienna 1991.
13. Nilsson, Å. Et Norstedt, U. (1992). *Förstudie, åldringstendenser i fyllningsdammar*. Stockholm: Vattenfall Vattenkraft. ISSN 1103-3134
14. Fyllningsdammar, undersökning, övervakning och reparation
15. Statens geotekniska institut (1995). *Cement och kalk för djupstabilisering av jord. En kemisk-fysikalisk studie av stabiliseringseffekter*. Linköping. Sig. Rapport No. 48. ISSN 0348-0755
16. Hansson P. (1994). *Cementinjektering, Handbok i materialteknik för injekterare*. Elforsk. Rapport 94:12
17. *Betonghandbok, Material* (1997). Stockholm: Svenskt Tryck AB
18. Czernin W. (1969). *Cementkemi för byggare*. Halmstad: Halmstad Boktryckeri AB. Svenska Cementföreningen
19. Pettersson K. (1991). *Betong i sur mark*. Cement och Betong Institutet. CBI-rapport 5:91. ISSN 0346-8240

-
20. Berner U. R. (1987). *Modeling porewater chemistry in hydrated portland cement*. Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 84
 21. Moskvina V. (1980). *Concrete and reinforced concrete deterioration and protection*. Moscow. Mir Publisher
 22. Sundius N. (1930). *About the question of carbonic acid influences on concrete*. The Swedish concrete association.
 23. Yokozeki et al. (2000). *Numerical modeling for predicting the degradation of cement-based materials due to calcium leaching*. Helsinki. Proc. from Integrated life-cycle design of materials and structures ILCDES 2000.
 24. Calkin H.W., Gibson, A.C. and Nobel, P.S. (1986) J. Exp. Bot, 37: 1054-1064
 25. Lunds Tekniska Högskola (2005). *Geoteknisk klassificering av de naturliga jordarterna* [www]. Hämtat från
<<http://connywww.tg.lth.se/Sv.jordarterdokument/indegeotegenskdokument/geotklass-dokument/geotekklassmorn.html>>. Senast källan kontrollerades: 6 april 2005.
 26. Taylor J. R. (1992). *An Introduction to Error Analyses*. 2:nd Edition. University Science Books Sausalito, California (1997). ISBN 0-935762-42-3



ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS – ELFORSK – AB
Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31
Telefon: 08-677 2530. Telefax 08-677 2535
www.elforsk.se