LÅNGTIDSEGENSKAPER HOS TÄTSKIKT INNEHÅLLANDE BENTONIT

Herman Brundin, SÖRAB
Anders Kihl, Ragn-Sells Avfallsbehandling AB
Anders Lagerkvist, Luleå Tekniska Universitet
Roland Pusch, Geodevelopment AB
Thomas Rihm, RVF Service AB
Rolf Sjöblom, ÅF-Energikonsult AB
Gustav Tham, Telge Återvinning AB

RVF Rapport 01:12
ISSN 1103-4092
ISRN RVF-R—01/12—SE

Rekonstruerad 2010-03-26 hos Tekedo AB
Originalrapporten finns bara i tryckt form
Denna rekonstruktion saknar RVF:s (nu Avfall Sveriges) förord

LÅNGTIDSEGENSKAPER HOS TÄTSKIKT INNEHÅLLANDE BENTONIT

Herman Brundin[1], Anders Kihl[2], Anders Lagerkvist[3], Roland Pusch[4], Thomas Rihm[5], Rolf Sjöblom[6] och Gustav Tham[7]

(1) SÖRAB
(2) Ragn-Sells Avfallsbehandling AB
(3) Luleå Tekniska Universitet
(4) Geodevelopment AB
(5) RVF Service AB
(6) ÅF-Energikonsult AB
(7) Telge Återvinning AB

Juni 2001

SAMMANFATTNING

I markanläggningar installeras ofta tätskikt med uppgift att reducera genomträngning av vatten. För detta syfte används bland annat syntetiska lergeomembran vilka består av två skikt av geotextilier med bentonit mellan. Bentonit är genom sitt innehåll av mineralet montmolillonit en starkt vattenupptagande och svällande naturlig lera som uppvisar låg vattengenomsläpplighet. Även naturliga leror innehållande höga halter montmorillonit kan användas liksom blandningar med sådana material.

Syftet med det uppdrag som redovisas i denna rapport är att söka identifiera vilka mekanismer och faktorer som kan tänkas vara begränsande för funktionen på kort och lång sikt hos tätskikt innehållande bentonit. Syftet är också att ge underlag för projektering, utformning och drift av deponier med sådana tätskikt.

I rapporten ges underlag och principer för utformning och byggande av deponier med fokus på användning av syntetiska lergeomembran, blandningar av bentonit och andra lermaterial i svenska deponier. Sammanställningarna innefattar också tre fallstudier avseende Högbytorp, Löt och Tveta.

De huvudsakliga slutsatserna är som följer.

1 Tätskikten kan ges en sådan utformning att de uppfyller olika krav avseende i första hand motstånd mot genomströmning av vatten och erforderlig släntstabilitet. Uppfyllande av dessa krav - även på lång sikt - innebär att följande omständigheter behöver beaktas: topografiska förhållanden och förekommande sättningar, varierande tillgång till vatten, frysning och upptining, vattenkemi, gasbildning och värmeutveckling.

2 Bottentätningar påverkas av lakvattnets sammansättningar, och topptätningar av eventuella differentiella sättningar. I båda fallen är utformningar med naturliga leror och blandningar med sådana robustare ur såväl kemisk som mekanisk synvinkel. Detta gäller även ämnen som tränger genom tätskikt med hjälp av diffusion, till exempel gaser.

3 Bentonitmattor erbjuder fördelar genom att de kan köpas färdiga och enkelt appliceras till en kvalitetssäkrad installation.

4 Generell övarvakning kan erhållas genom mätning (monitering) av lakvattnet. Någon enkel metod för identifiering av läget för ett läckage finns emellertid inte för närvarande.

EXECUTIVE SUMMARY

In geotechnical applications liners are often installed in order to substantially reduce water percolation. Different types of liners are used for this purpose including synthetic geoclay liners which consist of two sheets of geotextiles with bentonite inbetween. Through its content of the mineral montmorillonite, bentonite absorbs water strongly, swells and forms a gel which is only slightly permeable to water. Natural clays containing high amounts of montmorillonite can also be utilised as well as mixtures containing such material.

The purpose of the work presented in the present report is to identify the mechanisms and factors which can be limiting with regard to the performance - in the short term as well as in the long term - of membranes containing bentonite. The purpose is also to provide a knowledge base for design, planning and operation of waste disposal facilities in which such membranes are utilised.

In the report, a knowledge base is compiled and analyses made regarding bentonite, chemical and physical conditions in a disposal facility, mixtures of bentonite and other material as well as the use of bentonite in Swedish disposal facilities. The compilations also include three case studies regarding Högbytorp, Löt and Tveta.

The main clnclusions are as follows.

1 The membranes should be prepared and installed in such a manner that they fulfill different requirements regarding primarily resistance against penetration of water and regarding slope stability. The fulfillment of of these requirements[1] - also in the long term - implies that the following aspects need consideration: topography and ocurring subsidences, varying access of water, freesing and thawing, water chemistry, formation of gas, and evolution of heat.

2 Membranes at the bottom of a disposal facility are influenced by the chemical compositions of the leachates, and membranes at the top are influenced by differential subsidences. In both cases, designs with natural clays as well as mixtures containing such clays are more robust, from a chemical as well as from a mechanical point of view. This is the case also with regard to substances which penetrate membranes by means of diffusion, for instance gases.

3 Bentonite mats offer advantages in that they can be purchased ready made and in that they are not very difficult to install to a quality assured installation.

4 A general surveillance can be achieved by monitoring of the leach water. No simple method is available at present for the identification of the position of any leak, however.

[1] Alternatively, change in a predictable manner

NÅGRA BETECKNINGAR OCH DEFINITIONER

Beteckningar

K	=	hydraulisk konduktivitet, vattengenomsläpplighet, m/s
ν	=	medelgenomströmningshastighet, m/s
i	=	tryckfall över tätskikt, meter vattenpelare/meter tätskikt, d v s dimensionslöst
p_s	=	svällningstryck, kPa eller MPa
ρ	=	densitet, kg/m^3
ρ_d	=	torrdensitet (fasta massan / totala volymen), kg/m^3
ρ_{sat}	=	densitet vid vattenmättnad (fasta massan / totala volymen), kg/m^3
q	=	genomflöde, m^3
t	=	tjocklek hos tätskikt, m
w	=	vattenkvot (vikten vatten / vikten fast substans)

Definitioner

Anjon	Jon med negativ laddning
ASTM	Amerikansk standard (American Society for Testing and Materials)
Bentonit	Geologisk beteckning på leror med vulkaniskt ursprung och med innehåll av svällande lermineral, t ex montmorillonit
DIN	Tysk standard (Deutsche Industrienormen)
Duktil	Förmåga att varaktigt ändra form vid deformation utan att gå sönder
Eluering	Uttvättning till fullständighet
EU	EU-standard
Gel	Finkornig massa av kolloidala partiklar med viss, låg hållfasthet
ISO	Internationell standard
Katjon	Jon med positiv laddning
L/S kvot	Viktsförhållandet mellan vätska och fast fas
Montmorillonit	Det mest svällande mineralet i smektitfamiljen
Smektit	En klass av leror med svällande egenskaper
TS	Torrsubstanshalt

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

SAMMANFATTNING ii

EXECUTIVE SUMMARY iii

BETECKNINGAR OCH DEFINITIONER iv

INNEHÅLLSFÖRTECKNING v

1 BAKGRUND 1-1
- 1.1 Geosynteter 1-1
- 1.2 Syntetiska lergeomembran 1-1
- 1.3 Bentonit 1-2
- 1.4 Utformning av deponier 1-3
- 1.5 Långtidsegenskaper 1-5
- 1.6 Referenser 1-6

2 SYFTE OCH OMFATTNING 2-1
- 2.1 Frågeställningar av intresse 2-1
- 2.2 Syfte 2-2
- 2.3 Arbetets inriktning 2-2

3 BENTONIT, EGENSKAPER OCH ANVÄNDNING 3-1
- 3.1 Allmänt 3-1
- 3.2 Material 3-1
  - 3.2.1 Förekomst och behandling 3-1
  - 3.2.2 Mineraluppbyggnad 3-2
  - 3.2.3 Mikrostruktur 3-3
- 3.3 Funktion 3-7
  - 3.3.1 Allmänt 3-7
  - 3.3.2 Inverkan av lerkomponenters densitet 3-9
- 3.4 Fysikaliska egenskaper hos lergeomembran 3-11
  - 3.4.1 Allmänt 3-11
  - 3.4.2 Lermembrans genomsläpplighet av porvatten 3-12
  - 3.4.3 Lermembrans genomsläpplighet av gas 3-16
  - 3.4.4 Lermembrans svällningstryck 3-16
- 3.5 Funktionen hos lermembran på plats i en deponi 3-17
  - 3.5.1 Densitet och tätningsfunktion 3-17
  - 3.5.2 Skalberoende 3-18
  - 3.5.3 Diffusiv transport 3-18
- 3.6 Bentonits kemiska beständighet 3-18
- 3.7 Slutsatser och rekommendationer 3-20
- 3.8 Referenser 3-21

4 KEMISK OCH FYSIKALISK MILJÖ I DEPONIER 4-1
4.1 Inledning 4-1
4.2 Avfallets egenskaper 4-6
4.3 Utlakning från avfall 4-8
4.4 Upplagsprocesser 4-15
4.5 Upplagsteknik 4-20
4.5.1 Utformning av upplag 4-20
4.5.2 Drift av upplag 4-21
4.6 Sammanfattning och slutsatser 4-22
4.7 Referenser 4-23

5 UTFORMNING OCH ANVÄNDNING AV SYNTETISKA LERGEOMEMBRAN 5-1
5.1 Tilltänkt funktion i en deponi 5-1
5.2 Konstruktionsförutsättningar 5-2
5.3 Tillgängliga produkter 5-2
5.4 Tillverkning 5-5
5.5 Applicering 5-8
5.5.1 Utläggning av bentonitmattor 5-8
5.5.2 Skarvar, genomföringar och förankringar av bentonitmattor 5-9
5.5.3 Planering, dokumentation och projektledning 5-13
5.6 Provning och kvalitetskontroll 5-16
5.6.1 Allmänt 5-16
5.6.2 Bentonit 5-16
5.6.3 Geotextilier 5-21
5.6.4 Syntetiska lergeomembran 5-21
5.6.5 Syntetiska lergeomembran på plats i en deponi 5-23
5.7 Resultat från undersökningar 5-24
5.7.1 Allmänt 5-24
5.7.2 Ingående geotextilier och polymera material 5-25
5.7.3 Bentonitens tätande egenskaper i deponimiljö 5-28
5.7.4 Skjuvhållfasthet hos bentonitmattor i deponimiljö 5-30
5.8 Slutsatser och rekommendationer 5-35
5.9 Referenser 5-36

6 BLANDNINGAR AV BENTONIT, NATURLIGA LERMATERIAL, SCHAKTMASSOR OCH DYLIKT 6-1
6.1 Allmänt 6-1
6.2 Blandningar 6-1
6.2.1 Mikrostruktur 6-1
6.2.2 Fysikaliska egenskaper 6-3
6.3 Naturligt lerrika jordmaterial 6-4
6.3.1 Mikrostruktur 6-4
6.3.2 Fysikaliska egenskaper 6-4
6.4 Diskussion 6-4
6.4.1 Allmänt 6-4
6.4.2 Särskilda synpunkter på lerlager 6-5
6.5 Referenser 6-9
7 ANVÄNDNING AV BENTONIT I SVENSKA DEPONIER 7-1
8 SLUTSATSER 8-1
8.1 Allmänt 8-1
8.2 Utvecklingen under lång tid 8-1
8.3 Rekommendationer beträffande utformning och drift av deponier 8-4
8.4 Rekommendationer beträffande fortsatta utrednings- och utvecklingsinsatser 8-5

BILAGOR

A FALLSTUDIE HÖGBYTORP A-1
A1 Översiktskarta över område 2 A-11
A2 Delområden inom område 2 A-12
A3 Planerat system för uppsamling av lakvatten för delområdena 3 och 4 A-13
A4 Resultat från ULP[2]-test A-15
B FALLSTUDIE LÖT B-1
C FALLSTUDIE TVETA C-1
D LABORATORIEFÖRSÖK FÖR EXEMPLIFIERING AV BENTONITMATTORS GENOMSLÄPPLIGHET D-1
E SENASTE KUNSKAPSTILLSKOTT E-1

[2] ULP = Uniform Leaching Procedure

1 BAKGRUND

1.1 Geosynteter

I denna rapport behandlas *tätskikt*, vilka har till uppgift att reducera genomträngning av vätska eller gas. Dessa verkar genom att hindra flöde (konvektion / perkolation) men kan också ha betydelse som barriärer mot diffusion.

I markanläggningar finns behov av olika typer av funktion till exempel: separation, förstärkning, filtrering, dränering och inneslutning. Traditionellt åstadkoms tätskikt inom geotekniken med hjälp av *naturliga leror*. Under de senaste decennierna har emellertid *syntetiska geomembran* (synthetic geomembranes) kommit till allt större användning. Med begreppet syntetiska geomembran, eller bara geomembran, avses tjocka folier (minst en millimeter) av polyolefiner (polyetylen eller polypropylen) eller andra stabila polymerer som fogas till tätskikt, ofta genom svetsning. Dessa har funnits i några decennier.

Sedan drygt ett decennium har även *syntetiska lergeomembran* (geosynthetic clay liners), eller bara lergeomembran, kommit att användas alltmer. I dag används lergeomembran ofta i kombination med geomembran (i form av folie), men ibland läggs lergeomembran ensamt.

1.2 Syntetiska lergeomembran

Ett *syntetiskt lergeomembran* består av två skikt av geotextilier med bentonit mellan. Geotextilierna hålls samman med hjälp av längsgående sömmar med täta mellanrum eller med nålfiltning. I det senare faller består den ena geotextilien av ovävda fibrer (non-woven) vilka med små mellanrum tryckts genom bentoniten och genom den andra textilien som är vävd.

Bentonit är en starkt vattenupptagande och svällande naturlig lera som uppvisar ett stort motstånd mot vattengenomträngning. Den tätande komponenten består av smektitmineral av vilka montmorillonit är den vanligaste.

Med hjälp av ett lergeomembran med ett högklassigt lermaterial och med en tjocklek på någon centimeter kan man åstadkomma samma motstånd mot vattengenomströmning som med ett väl packat skikt med lågkvalitativ lera som har en mäktighet på en meter.

En viktig strategi inom den miljöinriktade delen av geotekniken är att kombinera naturliga och konstgjorda tätskikt, till exempel ett syntetiskt geomembran (en tjock plastfolie) med en naturlig lera. Barriärerna kan då verka oberoende av varandra och sannolikheten för samtidigt fel i båda är låg. Även ur långtidssynpunkt finns fördelar: ett naturligt material är jämförelsevis svårkarakteriserat men har bevisligen bevarats och behållit sina egenskaper under lång tid. Ett konstgjort material kan karakteriseras väl

och uppfylla högt ställda krav på homogenitet, medan egenskaperna under lång tid kan vara svårare att förutse jämfört med naturliga material.

Ibland kan det vara svårt att finna någon naturlig lera med lämpliga egenskaper. Då kan lergeomembran vara ett attraktivt alternativ. Bentonit är ett naturmaterial samtidigt som det genomgått olika industriella processer och därvid homogeniserats och testats i olika steg.

Prismässigt hävdar sig lergeomembran väl i konkurrensen med lagervis utlagd och packad lera. Det senare alternativet uppges i litteraturen kunna vara ekonomiskt fördelaktigt bara i de fall där det finns god tillgång till naturlig lera av hög och jämn kvalitet[1].

1.3 Bentonit

Bentonit är den geologiska beteckningen på leror med vulkaniskt ursprung och innehåll av svällande material. Huvudkomponenten är mineralet *montmorillonit*, som tillhör gruppen smektiter och som ger bentoniten dess unika egenskaper. Montmorillonit innehåller liksom andra lermineral mycket tunna skikt som ligger staplade på varandra. Skikten i montmorillonit har högre negativ laddning än i något annat lermineral. Den höga laddningen balanseras av positiva joner som tillsammans med vatten befinner sig på ytorna. Man använder beteckningen natriumbentonit om motjonerna utgörs av natriumjoner, och kalciumbentonit om de utgörs av kalciumjoner. Skikten ligger på varandra i "buntar" som bildar primära partiklar.

Bentonitens egenskaper hänger nära samman med två typer av effekter:

1 Upptagning av vatten mellan molekylskikten i en primär partikel
2 Vattenkemiskt beroende arrangemang av de primära partiklarna i förhållande till varandra

Båda dessa effekter är kraftigt beroende av slaget av motjoner samt vattenhalten och vattnets kemiska sammansättning. Bentonit har en stark tendens att ta upp vatten och svälla samt bilda en tät gel, särskilt om motjonerna utgörs av natriumjoner. Natriumbentonit kan svälla och fylla också ut en avsevärd volym även vid mycket höga vattenhalter

Närvaro av salt, syra eller bas eller tillgång till kalciumjoner eller andra flervärda katjoner kan leda till förändringar hos partikelarrangemenget (mikrostrukturen) så att bentonitgelen blir avsevärt mera genomsläpplig för vatten.

Bentonit har sedan många år ingått i borrvätskor som används i samband med oljeborrning. En viktig funktion hos en sådan vätska är att bilda ett tätande skikt på borrhålets väggar för att stabilisera hålväggen och förhindra förlust av borrvätska till omgivningen. Bland annat genom tillsats till

borrvätskan av lämpliga finmalda ämnen med hög densitet utövar denna ett hydrostatiskt tryck som överstiger det i formationen.

Sedan ett par decennier pågår forsknings- och utvecklingsarbete med bentonit som buffert i slutförvar för använt kärnbränsle. Bränslet placeras i kapslar av stål (mekanisk styrka) och koppar (korrosionsbeständighet) vilka deponeras i hål som borrats genom golvet i tunnlar som byggts i kristallint urberg på cirka 500 meters djup. Mellan kapslarna och berget finns en buffert som består av högtryckskompakterad bentonit.

Bentoniten tar upp vatten från det omgivande berget och sväller så att allt tillgängligt utrymme fylls. Materialet är mycket kompakt, vilket innebär att diffusionshastigheten för sådana ämnen som kan orsaka korrosion på kopparkapseln blir ytterst långsam, och inneslutningen av radionuklider mycket långvarig.

Bentonit används vidare för många olika syften i många produkter. Viktiga användningsområden inkluderar följande:

- formar för metallgjutning
- konsistensgivare (färg, tandkräm med mera)
- vattenrening
- kattsand
- tätningar och packningar
- tillsats till djurfoder
- järnmalmspellets

1.4 Utformning av deponier

I upplag kan lergeomembran ingå i såväl topptätning som bottentätning, vanligen i kombination med ett eller ett par syntetiska geomembran. Ett exempel på en utformning av en deponi med syntetiska lergeomembran visas i Figur 1.1.

Membranen har en väsentlig betydelse för deponins funktion, dels genom att reducera lakvattenbildningen genom att hindra vatten från att tränga in i upplaget och dels genom att reducera utläckage av lakvatten genom bottnen. Genom denna fördröjning av utlakningen skapar tätningarna en möjlighet att driva lakvattenbehandling och även en kontrollerad avfallsbehandling genom recirkulation av vatten genom avfallet.

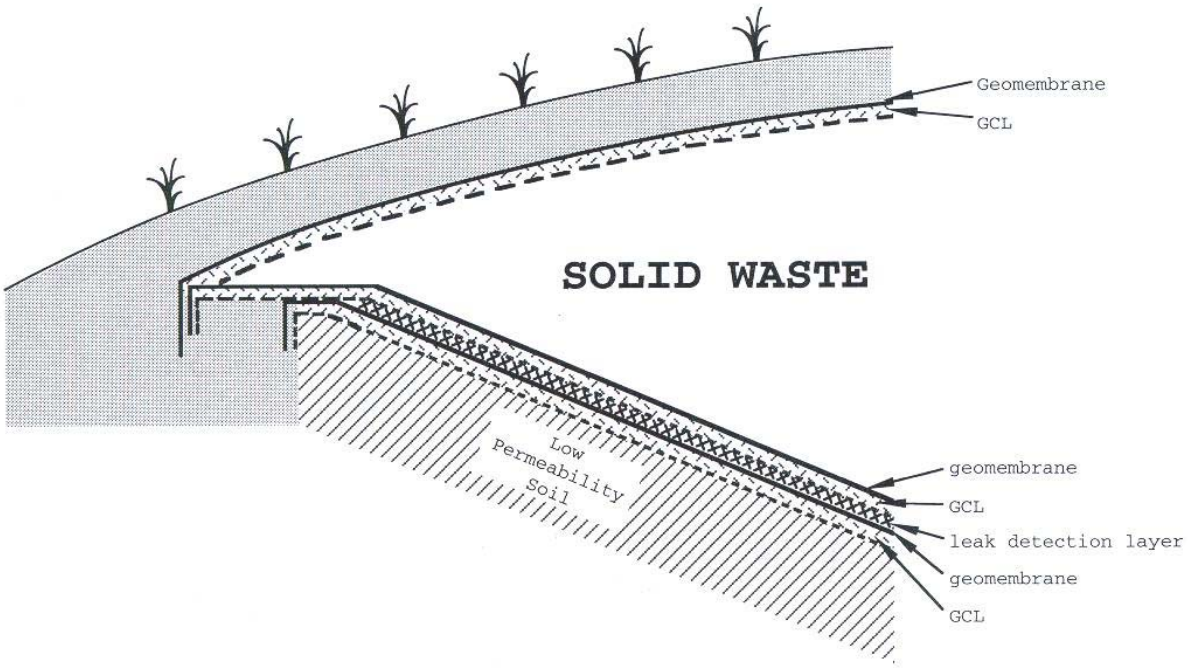
Membranen har också en väsentlig betydelse för deponins funktion genom att begränsa syretillförseln och därmed också nedbrytningshastigheten för det avfallsmaterial som finns i deponin i fråga.

Efter det att den aktiva driften av ett upplag har avslutats och sluttäckning har skett kommer driften av lakvattenrening och eventuell lakvattenrecirkulation att behöva fortsätta en tid, kanske upp emot 20 år (jämför Avsnitt 4). Efter denna tid följer en fas där lakvattenkvalitet och

mängd måste vara sådana att passiv uppsamling och behandling kan vara möjlig. Lakvattendräneringar måste dock även i detta skede fortvarigt kunna användas för uppsamling av de små mängder vatten som då trots topptätningen kan tränga in i deponin. På detta sätt erhålls en kontroll av täckskiktets täthet, samt information om de förlopp som äger rum i avfallsmassorna.

Om så erfordras kommer även insamlingssystem för deponigas att anläggas och drivas under upplagets aktiva fas. För den passiva fasen måste utformningen av täckskiktet vara sådant att det får en tillräcklig kapacitet för metanoxidation samt att gasflödena styrs till avsedda delar av täckskiktet.

Upplag skall fungera under obestämd tid, därför måste utformning och drift anpassas så att riskerna för oönskade utsläpp minimeras på såväl kort som lång sikt.



Figur 1.1. *Ett exempel på en principutformning av en deponi med syntetiska lergeomembran. Från [1].*

1.5 Långtidsegenskaper

Vid användning av syntetiska lergeomembran i geotekniska tillämpningar i allmänhet ställs krav på bland annat täthet och mekanisk stabilitet samt förmåga att tåla uttorkning och frost.

För användning i deponier ställs dessutom krav på förmåga att tåla den kemiska och fysikaliska miljön med bibehållna egenskaper under den tid som man avsett, det vill säga minst i decennier.

Det finns en omfattande internationell kunskaps- och erfarenhetsbas som kan utnyttjas för bedömningar och förutsägelser av den utveckling som ett syntetiskt lergeomembran kan tänkas genomgå under lång tid. Den innehåller bland annat följande komponenter:

- Det finns en geologisk och mineralogisk kunskap kring hur bentonit som används i lergeomembran bildats och utvecklats under många tiotals till hundratals miljoner år. Detta talar för att bentonit kan vara stabil under mycket långa tider i geotekniska tillämpningar.
- Vidare finns en omfattande baskunskap avseende bentonit som material i olika tillämpningar. För utvinning, behandling, hantering och transport av bentonit finns väl utvecklad teknik med goda möjligheter till kvalitetskontroll och kvalitetssäkring i varje steg. Lergeomembran samt ingående material (bentonit såväl som polymerer) har provats och undersökts ingående.
- Det finns också kunskap om på vilka sätt bentonit kan tänkas vara känslig för ämnen som kan finnas i vatten som kan tänkas komma i kontakt med bentoniten i en deponi.

Lergeomembran med bentonit har funnits på marknaden endast en relativt kort tid i förhållande till tilltänkt livslängd. Det kan därför vara klokt att tillämpa en slags försiktighetsprincip och utgå från att vissa av de problem som kan uppstå kanske visar sig först efter lång tid och därför kan vara svåra att upptäcka.

Särskilt viktigt är det använda den tillgängliga kunskapsbasen för att ge svar på de konkreta frågor som deponiägare ställer sig. Vilka material skall man välja? Hur skall installationer utföras för att resultatet skall bli som avsett. Hur fungerar de på kort och lång sikt? Bör några begränsningar gälla beträffande de materialtyper som ingår i avfallet?

1.6 Referenser

1 Koerner R M, 1997
Perspectives on geosynthetic clay liners. Symposium on testing and acceptance criteria for geosynthetic clay liners. Atlanta, Georgia, 29 January 1996. L W Well Editor. Published by ASTM, Pensylvania, Publication code number 04-013080-38. ISBN0-8031-2471-6.

2 SYFTE OCH OMFATTNING

2.1 Frågeställningar av intresse

Att bygga eller avsevärt förändra en deponi innefattar ett antal mer eller mindre komplicerade överväganden:

- Val av typ av tätskikt
- Utformning och utförande
- Program för övervakning
- Strategi beträffande lakvattnet
- Långsiktig hållbarhet hos barriärerna
- Samband med andra val av system och processer (t ex förbränning av hushållsavfall)

Varje innehavare av en deponi har ansvar för att ovanstående frågor blir beaktade på ett lämpligt sätt. I många fall etableras god industriell praxis i samverkan mellan olika företag, inte minst genom branschorganet RVF Svenska Renhållningsverksföreningen.

Ett sådant gemensamt intresse föreligger naturligtvis också beträffande de ovan nämnda bentonitmattorna samt beträffande användning av bentonit i blandning med andra material eller av naturliga leror.

I detta sammanhang ser *RVF Svenska Renhållningsverksföreningen* det som angeläget att det kommer fram råd som kan ges till medlemmarna om när det kan vara lämpligt att använda bentonitmattor och andra material som innehåller bentonit (t ex blandningar med sand) samt hur de bör användas. Det är också av stor betydelse för branschen att information som tas fram genom inventering samt forskning och utveckling blir tillgänglig för branschen i lämplig form.

SÖRAB överväger att använda bentonitmattor i olika delar av av sina deponier i Hagby och Vallentuna. Specifikt efterfrågas hur bentonit uppträder som tätskikt i överyta med anläggningar som dammar och diken, samt under transportvägar uppe på deponin. När det gäller bolagets nyanlagda deponi finns dessutom intresse för att studera bentonitmattor eller bentonitinblandning i bottentätning i bergsskärning.

Ragn-Sells Avfallsbehandling AB äger en stor deponi i Bro kommun (Högbytorp). Inom kort är ett område fyllt och skall täckas på lämpligt sätt, eventuellt med bentonit. Deponerat material innefattar i stor utsträckning stabiliserad aska och en viktig fråga är om det salt som kommer att finnas i lakvattnet kan komma att växelverka med bentonit på något mindre lämpligt sätt. En ny etapp planeras med deponering i celler och även här är frågan om eventuell växelverkan mellan avfall och linermaterial (syntetiska geomembran eller lergeomembran) aktuell.

Telge Återvinning planerar utvidgning av sin deponi för omhändertagande av jord som kontaminerats med arsenik. Schaktarbetena avses bli utförda under 2001 och eventuella installationer för övervakning bör göras samtidigt. Det innebär att underlag för beslut beträffande sådant program behöver föreligga dessförinnan. För närvarande framstår gummi och plastdukar som mindre attraktiva ur långtidssynpunkt.

Telge Återvinning utför också på försök deponering av aska ovanpå tidigare deponerat hushållsavfall.

Deponiägarna har sålunda behov av att få belyst vissa specifika anläggningsorienterade frågeställningar vilka kopplar till de ovan nämnda om bentonit (se avsnittet "Bakgrund om" ovan).

Frågeställningarna gäller topp- och bottentätningar, funktion under olika förutsättningar, samt konkreta rekommendationer beträffande val av material samt utformning av anläggning och provningsprogram.

2.2 Syfte

Syftet med uppdraget är att söka identifiera vilka mekanismer och faktorer som kan vara begränsande för funktionen på kort och lång sikt hos tätskikt innehållande bentonitmattor samt blandningar av bentonit och andra material.

Syftet är vidare att söka få fram ett kunskapsunderlag som kan användas för formulering av konkreta råd till innehavare av deponier beträffande användning av bentonit. Syftet är också att på lämpligt sätt ge tillgång till detta kunskapsunderlag.

Ett ytterligare syfte är att genom några fallstudier ge specifikt underlag avseende vissa tilltänkta och/eller befintliga deponier samt exemplifiering av de ovan nämnda mera generella resultaten.

2.3 Arbetets inriktning

För att kunna identifiera de mekanismer och faktorer som kan vara begränsande för bentonitens långtidsfunktion redovisas följande:

1 Beskrivning av de förhållanden under vilka tätskikt med bentonit förutsätts fungera på kort och lång sikt

2 Beskrivningar av tätskiktens utformning och applicering

3 Beskrivning av hur natriumbentonit och kalciumbentonit uppträder under dessa förhållanden på kort och lång sikt

4 Analys av tänkbara förändringar. Sådana förändringar kan komma uppkomma till följd av genomflöde (erosion), mekaniska spänningar

och rörelser (till exempel sättningsrörelser) samt den kemiska miljön i deponin.

De mekanismer och faktorer som identifieras utnyttjas för bedömningar av vad som kan vara rimliga tillvägagångssätt i samband med utformning och drift av deponier. Tanken är att övervägandena skall vara formulerade på ett sådant sätt att de kan användas av branschen för vägledning inför beslut.

Uppdraget avser också fallstudier. Dessa avser verkliga exempel på behov av tätning och frågor kring långtidsfunktionen, och utgör därför ett komplement till beskrivningarna avseende punkterna 1 - 4 ovan.

Arbetet har utförts av ett konsortium bestående av SÖRAB, Ragn-Sells Avfallsbehandling AB, Telge Återvinning AB, RVF Service AB, Luleå Tekniska Universitet, Geodevelopment AB och ÅF-Energikonsult AB. De fyra förra har även varit beställare tillsammans med Ångpanneföreningens Forskningsstiftelse. ÅF-Energikonsult AB har varit generalentreprenör samt svarat för projektledning och projektadministration.

Arbetsfördelningen har varit som följer:

Bentonit, egenskaper och användning	Geodevelopment AB
Kemisk och fysikalisk miljö i deponier	Luleå Tekniska Universitet
Utformning och användning av bentonitmattor	ÅF-Energikonsult AB
Användning av bentonit i svenska deponier	RVF Service AB
Fallstudie, Högbytorp	Ragn-Sells Avfallsbehandling AB
Fallstudie, Löt Avfallsanläggning	SÖRAB
Fallstudie, Tveta Avfallsupplag	Telge Återvinning AB
Analys, diskussion och slutsatser	Samtliga
Tryckning	RVF Service AB

3 BENTONIT, EGENSKAPER OCH ANVÄNDNING

3.1 Allmänt

Skälet till att bentonitmattor så ofta används för isolering av avfall är att de har mycket låg vattengenomsläpplighet och god svällningsförmåga som ger självläkning vid uppkomst av hålrum och bristningar.

I detta avsnitt behandlas egenskaper och funktion hos lermaterial vilka föreligger i en sådan form att man kan anbringa dem på plats där en deponi skall anläggas och i olika skeden av deponibyggen. Detta innebär att de utgörs av torkat och malt lermaterial med fokus mot förtillverkade lermembran eftersom de är förhållandevis billiga och kan anbringas på ett rationellt sätt. Lagervis utlagt lermaterial som kompakteras på plats diskuteras som ett alternativ.

3.2 Material

3.2.1 Förekomst och behandling

Lermaterial förekommer världen över i form av bergvittringsprodukter eller nybildade kristaller i hav och sjöar. I berg finns de ofta kvar i form av lerzoner där de bildats, men den helt dominerande mängden leror har flod- och vindtransporterats och bildat sediment. Bildningssättet hos sedimenten har inneburit lagervis avsättning under varierande förhållanden med avseende på vattnets strömningshastighet, erosion och salthalt och det har gett variationer i densitet, kornstorlek och partikelorientering. De leror som har störst användning vid deponitätning är smektitrika och benämns bentoniter som definitionsmässigt bildats av vulkanisk aska som avsatts i havet och vars glaskomponent spontant omvandlats till smektit.

De flesta av de i naturen förekommande smektitrika bentonitlagren har ringa tjocklek och ett joninnehåll som inte ger bästa gelbildnings- och tätningsegenskaper. Detta är fallet då leran är kalciummättad och därför görs normalt sodabehandling för att få natriummättnad och därmed bättre kvalitet. Den ringa lagertjockleken hos många fyndigheter gör täkterna svårutnyttjade och kostnaden för kommersiella bentoniter blir därmed hög, särskilt då hög och jämn smektithalt efterfrågas. Brytvärda bentoniter finns på alla kontinenter men den mest omfattande exploateringen äger rum i Nordamerika, huvudsakligen i Wyoming, South Dakota och Texas. I Europa förekommer bentonit i kalciumform rikligt i Tyskland, Spanien, Italien och Grekland.

Leriga jordmaterial utan eller med ringa innehåll av smektitmineral men med exceptionellt lämplig kornstorleksfördelning för att i packat tillstånd uppnå hög densitet och låg genomsläpplighet är moränlerorna. De lämnas dock därhän i denna rapport eftersom de i de flesta fall inte representerar något tekniskt/ekonomiskt optimum.

3.2.2 Mineraluppbyggnad

Lermineral är av skiktgittertyp med kiselsyretetraedrar i hexagonal ringform kopplade till OH-oktaedrar med aluminium, magnesium eller järn som central jon. Tetraedrarna kan i centrum ha aluminium istället för kisel och alla dessa substitutioner ger olika elektriska laddning hos partiklarna och därmed olika egenskaper hos leran. En typisk egenskap hos lermineralen är att kristallgittren saknar en viss mängd positiva joner, vilket ger dem negativ laddning och därmed förmåga att binda katjoner. Eftersom dessa bär med sig vattenmolekyler binder lermineralen vatten. Man skiljer på de icke expanderande lermineralen, främst kaolinit, klorit och illit, och de som expanderar, varav smektiterna med montmorillonit som viktigaste representant är de från praktisk synpunkt mest betydelsefulla. Expansionen hos en enskild partikel sker vinkelrätt mot skiktningen genom att katjoner och vatten byggs in i mellanrummet mellan skikten och också genom att partiklarna har en stark förmåga att bilda lergeler. Lermineralen kan inte bilda stora kristaller och partiklarna är därför alltid mindre än ca 2 tusendels millimeter.

Lerpartiklarnas ringa storlek ger en stor specifik yta som i kombination med den vattenbindande förmågan ger plastisk karaktär åt leran. Smektiterna har en specifik yta av ca 800 m^2 per gram och deras vattenbindande förmåga är därför avsevärt större än de icke expanderande lermineralens vars specifika yta är ca 10 till 50 m^2 per gram. Vid hög densitet hos smektitrika leror finns bara ett vattenmolekyllager mellan skikten i en partikel, medan låg densitet, som fås då partiklarna får ta upp vatten och expandera, innebär att flera lager kan byggas in. Detta vatten, som har låg rörlighet, utgör en stor andel av porvattnet i smektitrika leror med hög densitet, vilket ger dem en extremt låg genomsläpplighet.

De smektitrika lerornas uppbyggnad gör dem till de mest effektivt tätande jordmaterialen och därmed till självklara komponenter i deponiernas topp- och bottentätningar. I många sammanhang ser man smektitrika leror och bentoniter som synonymer.

3.2.3 Mikrostruktur

Bentonitens egenskaper styrs dels av dess uppbyggnad i den molekylära skalan, dels av dess mikrostruktur. De mycket tunna mineralskikten förekommer i stackar om några molekylskikt vilka bildar primära partiklar. Partiklarna har skivform med ett förhållande mellan höjd och diameter av storleksordningen 1 : 100. Diametern understiger i de flesta fall en tusendels millimeter. Utbytbara motjoner finns såväl på skiktens ytterytor som på deras innerytor, liksom vatten som är associerat till dessa joner samt silikatskiktens ytor, så kallat bundet vatten.

Vid hög densitet är huvuddelen av vattnet bundet och bildar ett eller två molekylskikt mellan skikten. Vid låg densitet tas mera vatten upp mellan skikten och andelen fritt vatten, d v s porvatten mellan partiklarna kan bli större

än det bundna vattnet. Det är det fria porvattnet som svarar för huvuddelen av den ringa vattenströmning som sker genom bentonit.

Upptagningen av vatten mellan silikatskikten är starkt beroende av por vattnets kemi. Vid låga salthalter och då natrium är motjon kan en stor mängd vatten tas upp mellan silikatskikten i en primär partikel med bibehållen stapling, upp till något tiotal molekylskikt. Om motjonen är kalcium, eller om porvattnet innehåller salt, sker endast ett ringa upptag.

Man skiljer mellan två sorters upptag av bundet vatten. Upp till tre molekylskikt vatten mellan silikatskikten kan ha en viss ordning och man talar om kristallin svällning. Ytterligare vattenupptag sker till följd av osmotisk svällning. Motjonerna finns i vattnet mellan skikten och upptaget av vatten är en osmotisk effekt.

Motsvarande effekter förekommer mellan de primära partiklarna i en suspension. Envärda motjoner, t ex natrium, samt låg salthalt gynnar bildning av laddade primära partiklar med moln av motjoner runtomkring. I suspension kan dessa förekomma som enstaka partiklar. Sådana partiklar har negativ laddning på sidoytorna och positiv laddning på kanterna. Vid tillsats av salt till vattnet krymper molnen av motjoner och positiva kanter kan associeras med negativa sidoytor. Effekten kallas flockulering. Om man i stället hade bytt jonerna mot tvåvärda, men utan att öka salthalten hade de primära partiklarna i stället staplat sig på varandra och bildat aggregat i form av "superstackar". De olika möjligheterna visas i Figur 3.1.

Kritisk flockningskoncentration för natriumbentonit som funktion av pH visas för några salter i Figur 3.2.

Upptag av vatten som funktion av tiden visas för natrium- respektive kalciumbentonit i Figur 3.3.

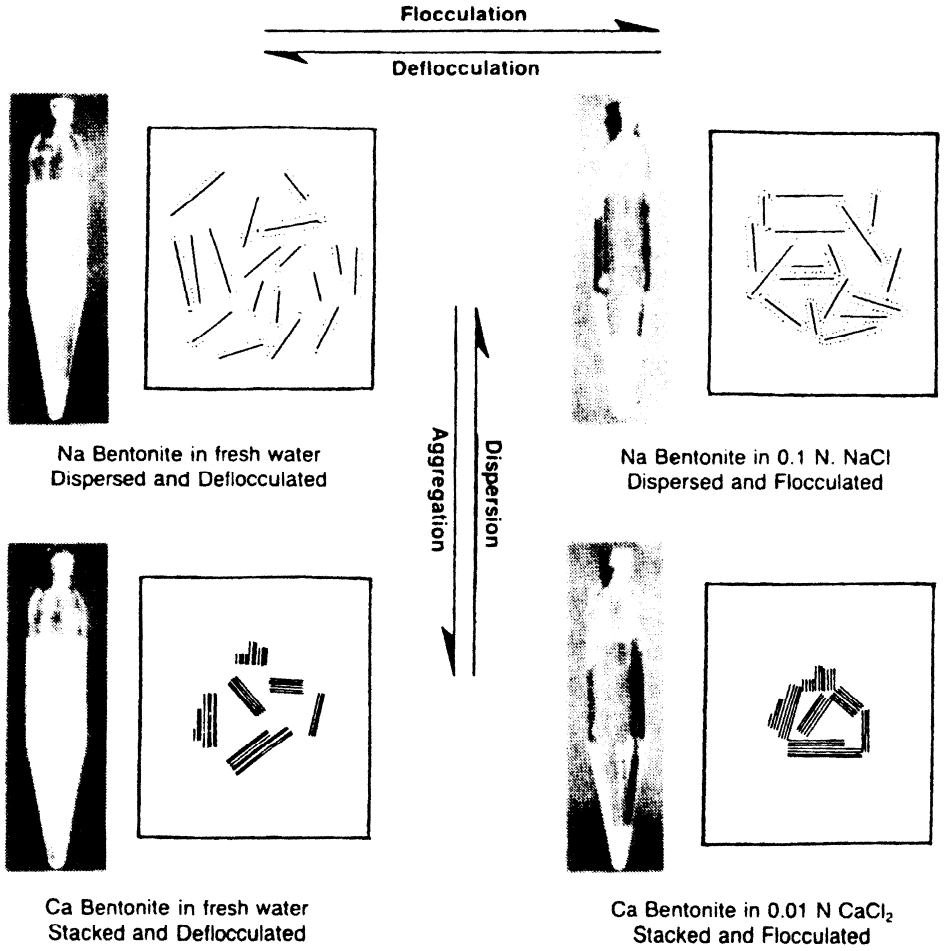
Motståndet mot flöde genom ett poröst medium är kraftigt beroende av porstorleken. Därför är en flockad struktur mycket tätare än en aggregerad, för jämförbara halter fritt vatten. Hur genomsläppligheten kan påverkas av mikrostrukturen illustreras i Figur 3.4.

Mikrostrukturen beror även av historiken, vilket visas i Figur 3.5. En dispergerad natriumbentonit som försätts med kalciumjoner övergår momentant i en flockulerad struktur. Den stabila formen är emellertid aggregerad, varför den flockulerade så småningom omlagras till en sådan form. Omlagringen i fråga leder till en ökning av genomsläppligheten.

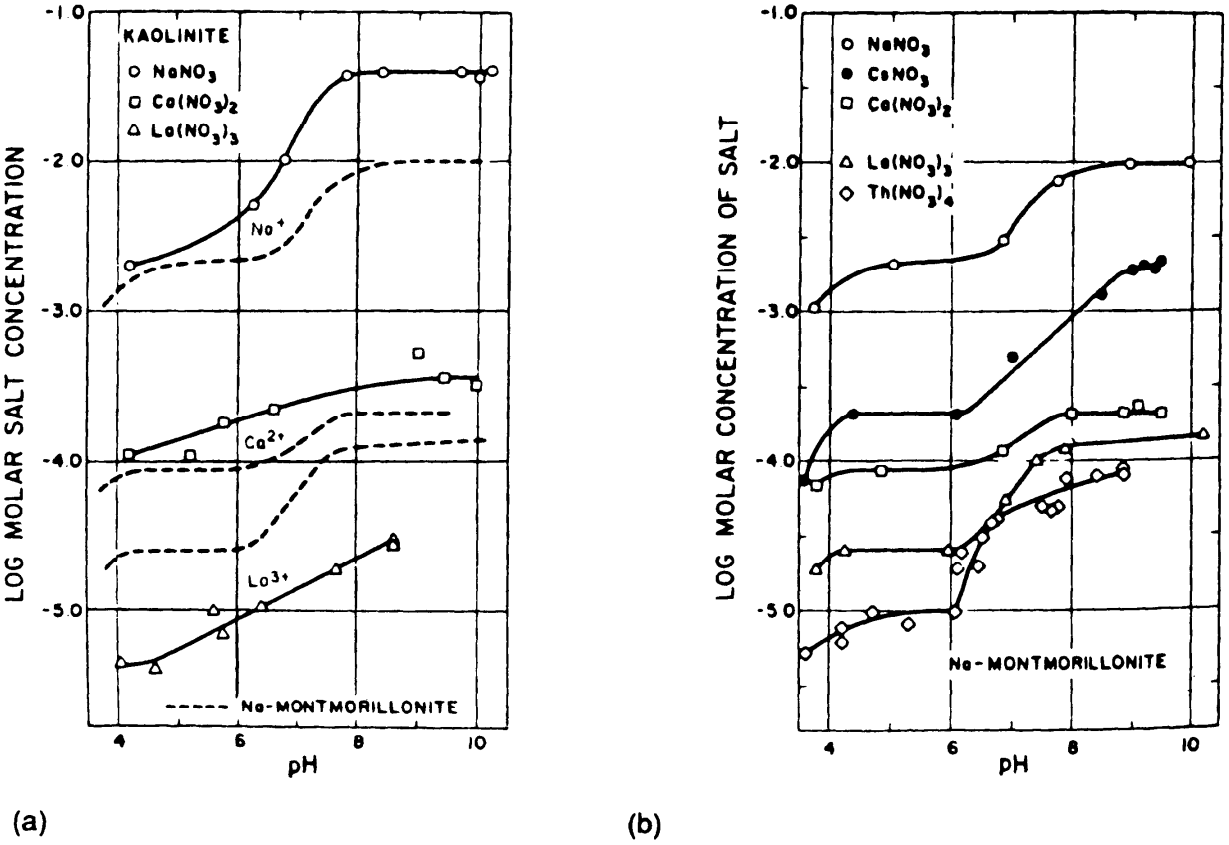
Sådana effekter har betydelse i samband med användande av bentonit i borrvätskor[1]. I dessa används bentonit bland annat för att erhålla ett tätskikt mellan borrhålet och den geologiska formationen. Om grundvattnet är salt, blir även borrvätskan salt. Om vidare bentonit slammas upp i salt borrvätska erhålls en aggregerad mikrostruktur med hög genomsläpplighet. Därför brukar man i stället försätta torr bentonit med sött vatten och låta en dispergerad eller flockulerad mikrostruktur utveckla sig. När man därefter till-

sätter detta slam till borrvätskan erhålls en flockulerad struktur som ger en god tätning. Effekten är emellertid övergående, och så småningom utformas den stabila aggregerade mikrostrukturen.

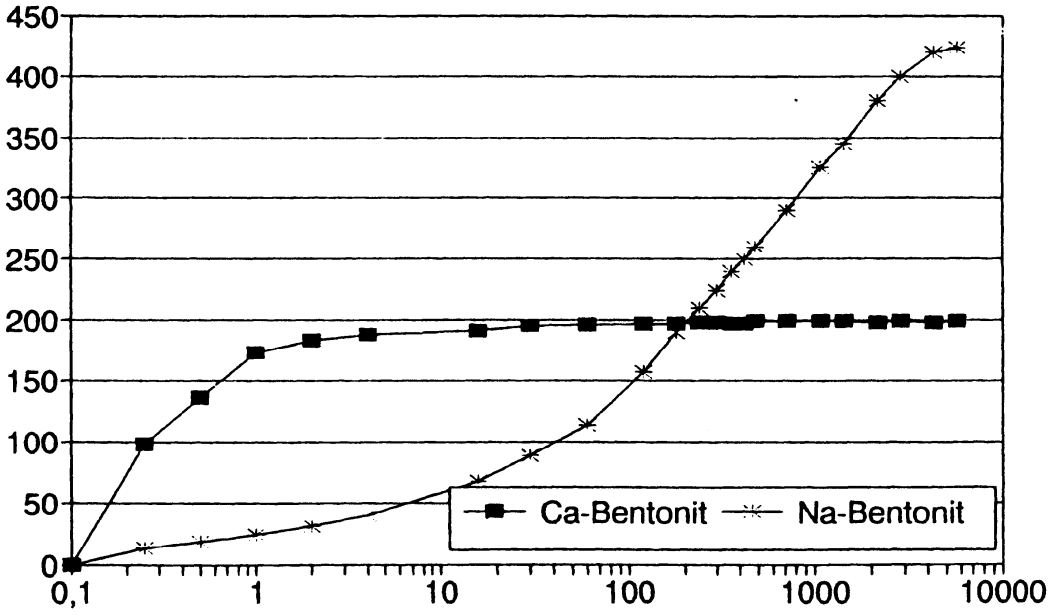
Motsvarande fenomen uppträder i syntetiska lergeomembran samt i blandningar av bentonit och andra material. Effekterna av detta beskrivs i efterföljande avsnitt.



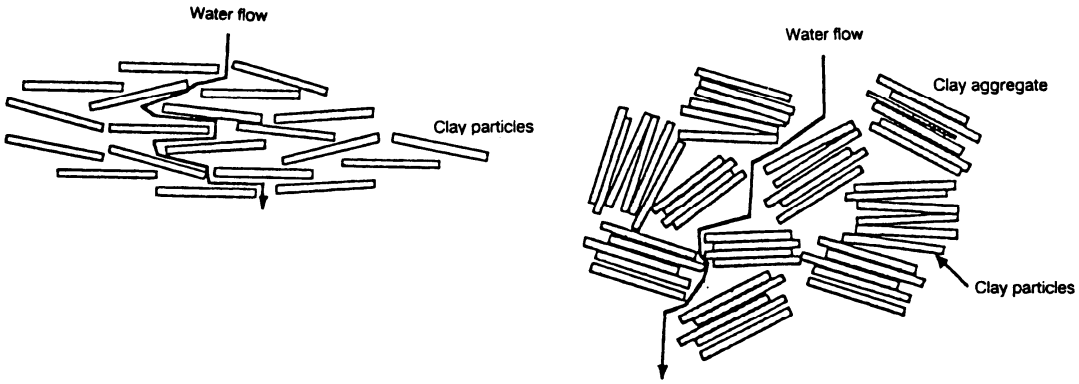
Figur 3.1. *Schematisk illustration av mekanismerna för flockulering - deflockulering och aggregering - dispersion. Från [1]*



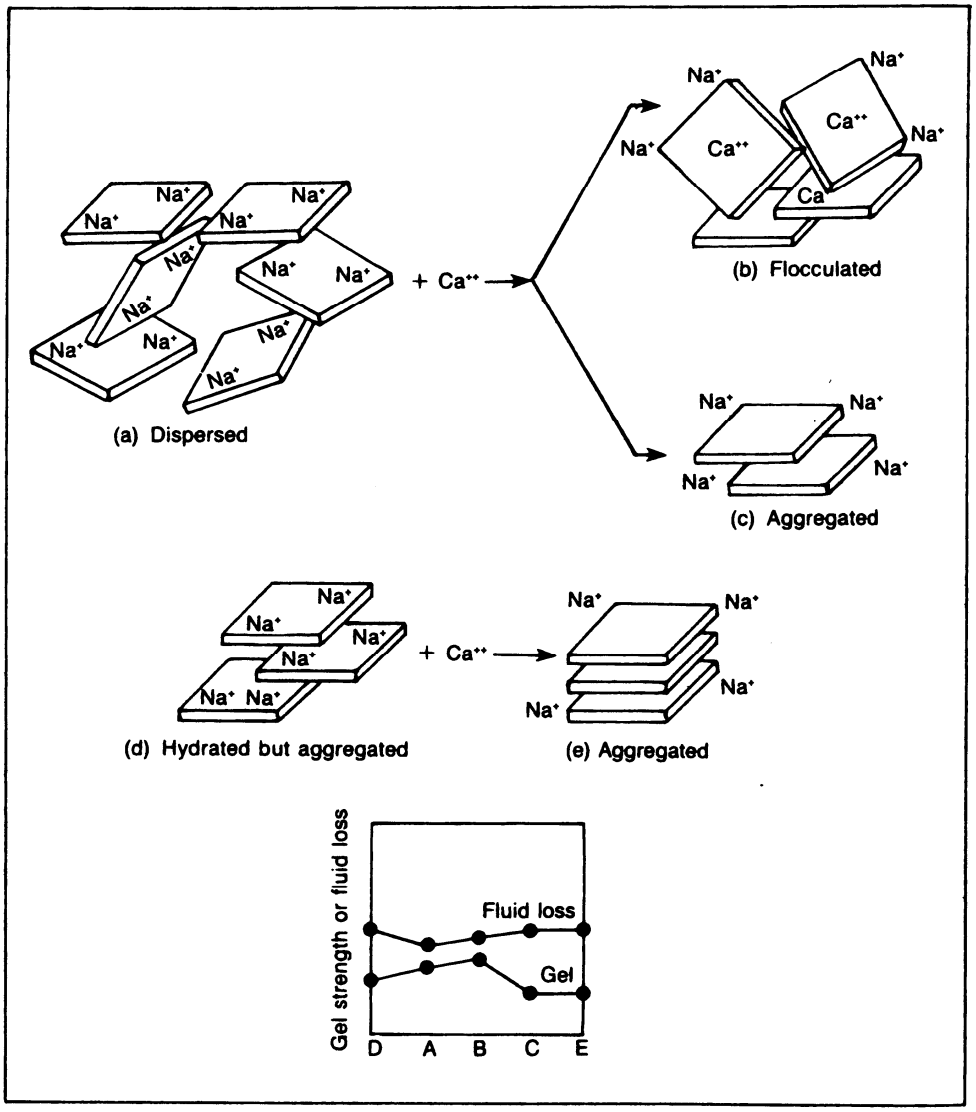
Figur 3.2. *Kritisk flockuleringskoncentration för natriumbentonit som funktion av pH för några salter. (a) Dispersion med kaolinit (25 ppm; heldragen linje) och natriummontmorillonit (streckad linje). (b) Dispersion med natriummontmorillonit (250 ppm) Från [2,3].*



Figur 3.3. *Upptag av vatten som funktion av tiden för natrium- respektive kalciumbentonit. Från [4]*



Figur 3.4. *Illustration av hur genomsläppligheten kan tänkas påverkas av bentonitens mikrostruktur. Från [4,5]*



Figur 3.5. *Inverkan av kalcium på mikrostrukturen hos natriumbentonit. Från [6]*

3.3 Funktion

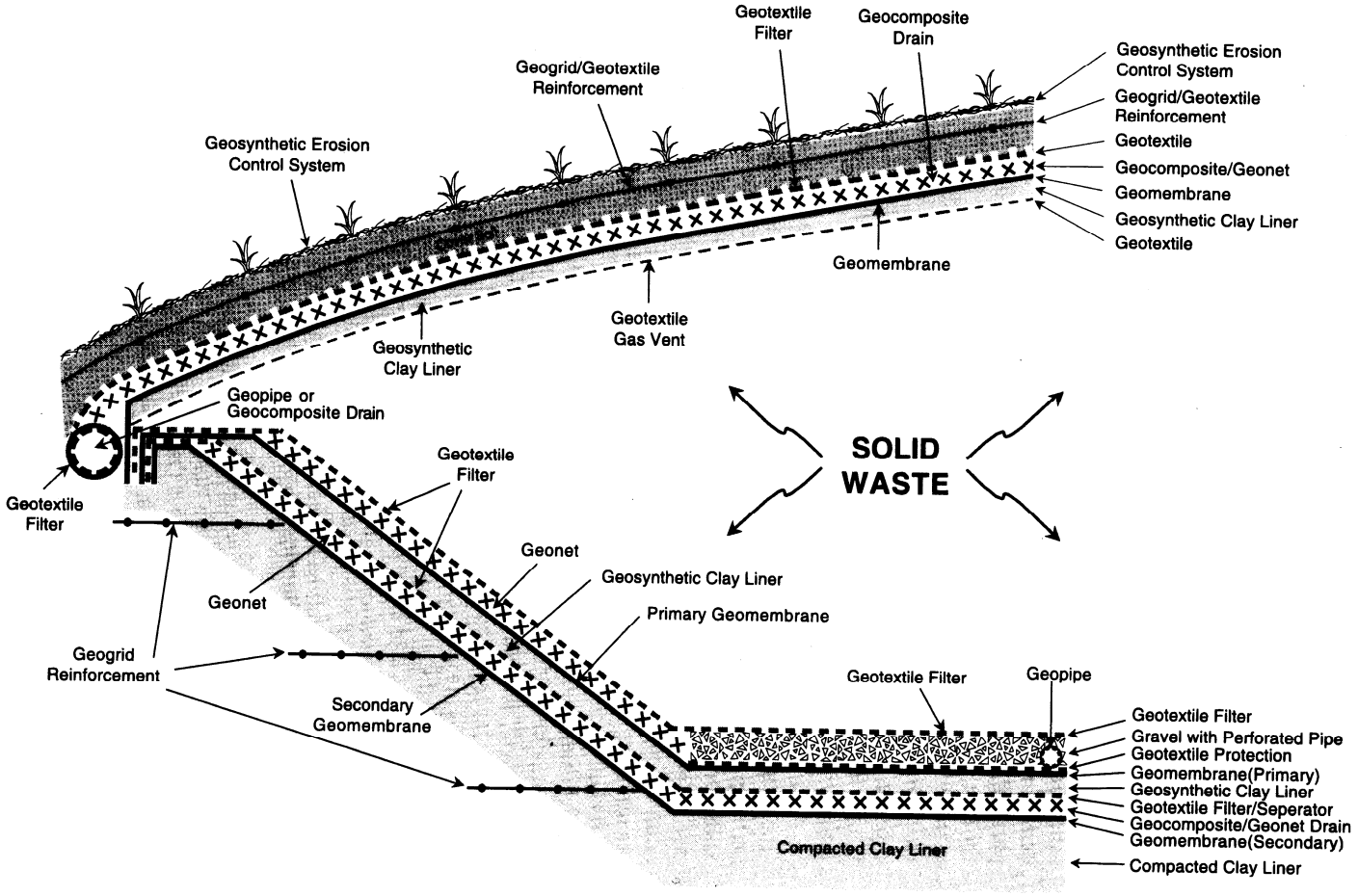
3.3.1 Allmänt

Lertätningar i form av lermembran eller lerlager kan användas som bottentätning och topptätning av avfall enligt principsektionen i Figur 3.6. De har olika verkningssätt beroende på skillnad i tjocklek och därmed fysikalisk och kemisk stabilitet. En tätning kan utsätts för ett vattenövertryck som kan ge en hydraulisk gradient av storleksordningen 5 till 1000 (m vattenpelare tryckskillnad per meter strömningslängd) och en vattenkemi som kan innebära lågt eller högt pH och risk för upplösning av mineralinnehållet[7]. Vidare kan den exponeras för katjoner med helt olika påverkan på lermaterialets struktur och därmed fysikaliska egenskaper som följd. En topptätning utsätts för temperaturväxlingar med risk för uttorkning och frysning, sur nederbörd och mekaniska spänningar som följd av rörelser hos underliggande avfallsmassa. Dessutom kan temperaturhöjning uppstå till följd av metanoxidation, se Avsnit 3. En mycket viktig egenskap hos lerbaserade topptätningar är att de måste kunna släppa igenom gas från nedbrutet organiskt avfall utan att bli heterogena, vilket kräver en självläkningsförmåga som endast möjliggörs av smektitiskt lerinnehåll.

En närmare beskrivning av uppbyggnaden hos en deponi samt de ämnen som finns och utvecklas där ges i Avsnitt 4.

Till fast avfall hör inte bara fast oorganisk substans utan också organiskt, nedbrytningsbart och starkt kompressibelt hushållsavfall, se Avsnitt 4.2.1. När det gäller starkt sättningsbenäget avfall kan lertätningar endast användas som bottentätning.

Kraven på lertätningars funktion har tidigare inte funnits specificerade i statliga svenska normer och föreskrifter utan har bestäms för varje enskild tillämpning och då endast i form av ett högsta tillåtet genomflöde (transmissivitet) eller hydraulisk konduktivitet vid genomströmning med destillerat vatten under laboratorieförhållanden. Det har inneburit att densiteten och påverkan av olika vattenkemiförhållanden inte beaktats och att man bortsett från förhållandena på plats i deponier där skaleffekter, det vill säga volymsberoende variationer, påverkar funktionen och där rörelser kan åstadkomma bristningar som radikalt kan förändra verkningssättet. Det är betydelsen härav som man måste värdera och lägga till grund för valet av design och material på det sätt som diskuteras i denna rapport.

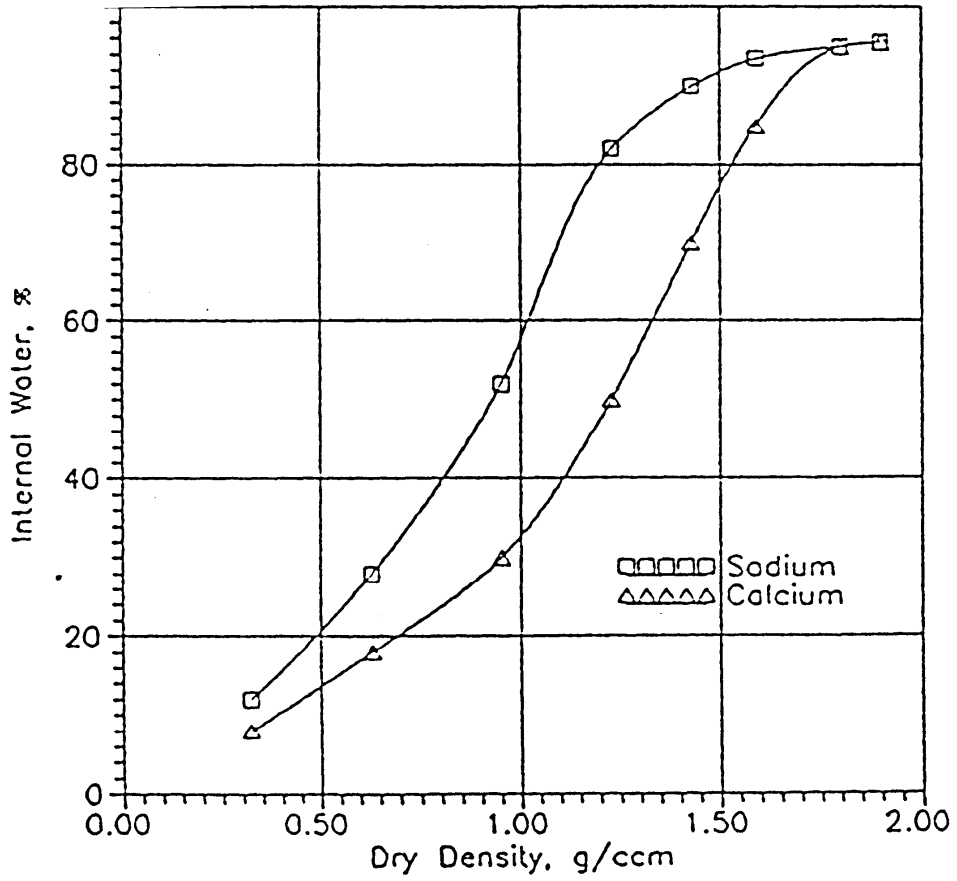


Figur 3.6. *Isolering av fast avfall med användning av olika syntetfilter varav lermembran ingår som topptätning och bottentätning[8].*

3.3.2 Inverkan av lerkomponentens densitet

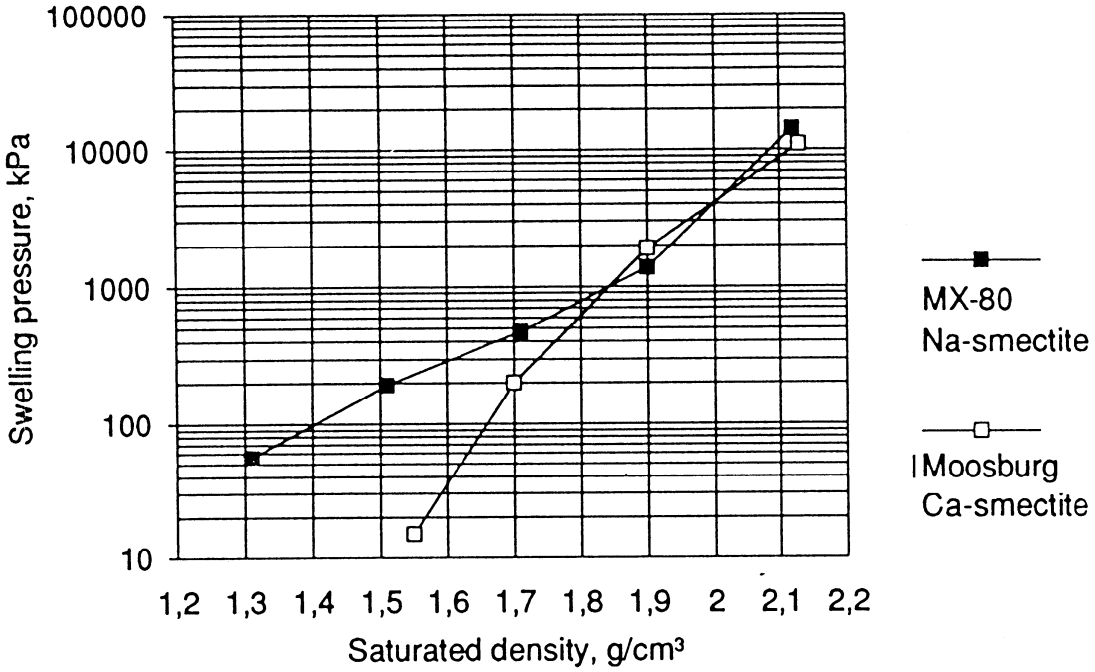
Tillverkarnas beskrivningar av lergeomembran anger inte lerkomponentens densitet vilket kan bero på insikten om att den varierar med överlagringstrycket, d v s höjden hos den erosionsskyddande överbyggnaden. Frågan om densitetens betydelse för den fysikaliska funktionen hos lermaterial har behandlats i detalj i Svensk Kärnbränslehantering AB:s (SKB:s) och dess systerorganisationers omfattande forskningsarbete [7,9]. För smektitiska lermaterial, som bentoniter är representanter för, har den en större betydelse än för andra lermaterial vilket beror på att en stor del av porvattnet är bundet till mineralsubstansen och orörligt vid hög densitet medan strukturen är mycket öppen vid låg densitet och ger hög vattengenomsläpplighet relativt sett.

Som närmare beskrivits i Avsnitt 3.2 kan vattengenomsläppligheten för en given densitet variera med den kemiska sammansättningen hos porvattnet. Figur 3.7 visar den procentuella andelen rörligt och orörligt porvatten som funktion av densiteten vid Na och Ca som dominerande katjon. Skillnaden beror på att specifika ytan är mycket större i det första fallet eftersom partiklarna är mindre. Man kan se Ca som representant för alla två- och flervärda katjoner. Anjonslaget, t ex Cl, SO_4, NO_3, har ringa betydelse i sammanhanget.

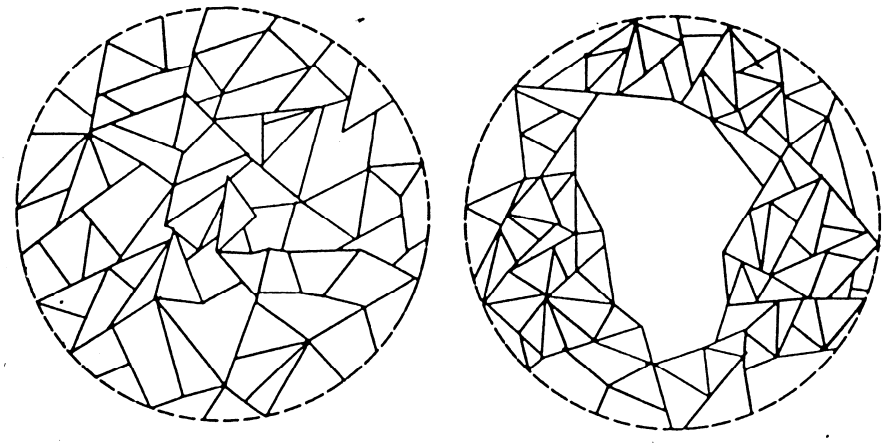


Figur 3.7. *Andelen fast bundet ("internal") porvatten i smektitrik lera (MX-80 från Volclay Ltd) då Na och Ca är dominerande katjoner [7].*

Densiteten är också avgörande för svällningsförmågan och det svällningstryck som utbildas då leran, som i geomembranfallet, är instängd i en deponi. Drivkraften är dels den starka vattenbindande förmågan hos smektitpartiklarnas inre, dels det osmotiska trycket vid partiklarnas kontaktpunkter. Sambandet mellan densitet och svällningstryck illustreras schematiskt i Figur 3.8. Ett mycket viktigt förhållande är att den täta lerstrukturen inte är stabil då porvattnet innehåller höga koncentrationer av Ca eller andra två- eller flervärda katjoner och densiteten underskrider ca 1600 kg/m^3. Leran koagulerar och separerar med uppkomst av fritt vatten i stora porer som följd (Figur 3.9).



Figur 3.8. *Påverkan av densiteten på svällningstrycket vid olika porvattenkemi [10].*



Figur 3.9. *Koagulering av lergel. Vänster: Homogent system av lerpartiklar. Höger: Heterogent system genom aggregering av det homogena systemet. Densiteten hos elementet är densamma i båda fall[10].*

3.4 Fysikaliska egenskaper hos lergeomembran

3.4.1 Allmänt

De viktigaste fysikaliska egenskaperna, den hydrauliska konduktiviteten, gaskonduktiviteten och svällningstrycket, är starkt skalberoende och avhängiga densiteten. De kan sålunda vara tillfredställande hos små laboratorieundersökta prover medan stora membranytor kan ha större gemomsläpplighet som följd av lokala densitetsvariationer och bristningar. Vid vattenmättnad expanderar den från början lufttorra lerkomponenten till den densitet som ger ett svällningstryck som svarar mot överlagringstrycket, d v s det effektivtryck (skillnaden mellan totaltryck och vattentryck) som råder på membrannivån. En avgörande fråga är därför vilken överbyggnad som membranet ifråga har och Tabell 3.1 ger exempel på detta. Vanligen har överbyggnaden en tjocklek av 1-3 m men ökning härav kan vara motiverad för att hindra tjälens nedträngning.

Tabell 3.1. *Typiska effektiva överlagringstryck.Topptäckningarna föutsätts vara belägna omedelbart över grundvattenytan.*

Fall	**Överbygg-nads-material***	**Överbygg-na-dens densi-tet**, kg/m^3**	**Över-byggnads-tjocklek, m**	**Effektivt överlagrings-tryck, kPa**
Topptätning	Sten, grus, sand	1800	0,5	9
Topptätning	Sten, grus, sand	2000	0,5	10
Topptätning	Sten, grus, sand	1800	1,0	18
Topptätning	Sten, grus, sand	2000	1,0	20
Topptätning	Sten, grus, sand	1800	2,0	36
Topptätning	Sten, grus, sand	2000	2,0	40
Topptätning	Sten, grus, sand	2000	3,0	60
Topptätning	Sten, grus, sand	2000	4,0	80
Bottentätning	5 m avfall	2000	2,0	100
Bottentätning	10 m avfall	2000	2,0	140
Bottentätning	20 m avfall	2000	2,0	200

*Skyddstäckning, skyddsskikt, ** Vattenmättad

Om överlagringstrycket på ett lergeomembran är lägre än det svällningstryck som membranet utövar så kommer det att expandera tills balans mellan trycken uppkommer. Härvid minskar lerkomponentens densitet i membranet och därmed ökar genomsläppligheten, d v s den hydrauliska konduktiviteten och gaskonduktiviteten. Omvänt så kommer ett högre överlagringstryck än svällningstrycket att ge kompression av lerkomponenten med minskad genomsläpplighet som följd.

3.4.2 Lermembrans genomsläpplighet av porvatten

Grundläggande för ett lermembrans genomsläpplighet av porvatten är följande:

1 Hydrauliska konduktivitetens beroende av porvattenkemin
2 Densitetsfördelningen hos lerkomponenten
3 Funktionen hos syntetkomponenten

De styrande faktorerna belyses här med fokus på porvattenkemins betydelse för lerkomponentens struktur och genomsläpplighet.

Inverkan av porvattnets elektrolyter på lerkomponentens hydrauliska egenskaper

Inverkan av porvattenelektrolyterna på lerkomponentens egenskaper illustreras av Tabell 3.2, vars testvärden verifierar de allmänna samband som antytts i Avsnitt 3.2. När det gäller genomsläpplighet finner man att den är mycket låg vid genomströmning av lera med elektrolytfattigt vatten också vid mycket låg densitet, medan genomströmning med vatten med hög elektrolythalt eller med dominerande innehåll av flervärda katjoner kan ge en million gånger högre genomsläpplighet. Skillnaden beror på att lerstrukturen är mycket homogen vid låg salthalt medan den koagulerar och får stora kontinuerliga porer med hög genomsläpplighet som följd vid hög salthalt (jämför Figur 3.9).

Mättnad och genomströmning med kalciumdominerat vatten ger en ökning av genomsläppligheten som illustreras av Tabell 3.2. Värdena är helt i enlighet med principerna i Avsnitt 3.2.

Tabell 3.2. *Hydraulisk konduktivitet(K) hos smektitisk lera (MX-80) med 70-80 % montmorillonit [7]. Det första värdet representerar porvatten med lågt elektrolytinnehåll (sött eller svagt bräckt vatten) medan det andra svarar mot vatten med en salthalt motsvarande oceanvatten (Na resp Ca).*

Dominerande katjon	Densitet, kg/m^3	Hydraulisk konduktivitet, K, m/s	
		sött vatten	salt vatten
Na	1400	$2 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Na	1600	$3 \cdot 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-10}$
Na	1800	$4 \cdot 10^{-13}$	$4 \cdot 10^{-12}$
Na	2000	$4 \cdot 10^{-14}$	$1 \cdot 10^{-13}$
Ca	1400	$1 \cdot 10^{-6}$	$>1 \cdot 10^{-5}$
Ca	1600	$5 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-7}$
Ca	1800	$4 \cdot 10^{-13}$	$4 \cdot 10^{-12}$
Ca	2000	$2 \cdot 10^{-13}$	$4 \cdot 10^{-13}$

Organiska ämnen kan ha en liknande påverkan på konduktiviteten. Sålunda är det välkänt att leriga jordarter har betydligt högre *K*-värde om de genomströmmas av hydrokarboner i stället för vatten. I litteraturen redovisas fall då konduktiviteten ökat med 4-6 storleksordningar (tiopotenser) då xylen eller benzen genomströmmar smektithaltig lera med en densitet av 1875 kg/m^3 [11]. Alkoholer och aceton ger en ökning med 2-3 storleksordningar. Förklaringen till den starka konduktivitetsökningen, som har avgörande betydelse för design av bottentätningar, är koagulering hos smektitgelen i lerlagret.

Inverkan av lerkomponentens densitetsfördelning i membran på hydrauliska konduktiviteten

Typiska tvärsektioner av lermembran illustreras av Figur 3.10. Tillverkningen innebär i vanliga fall att lufttorrt eller obetydligt fuktat, finmalt lerpulver läggs mellan syntetmattor som fogas med söm eller nålfiltning, se Avsnitt 5.4. I vissa membran används en fästsubstans av ospecificerad typ för att binda lermaterialet till syntetmattorna. Grundstrukturen hos lerkomponenten har karaktären av granuler av varierande storlek med hålrum emellan vilket ger en skrymdensitet som kraftigt understiger densiteten i de kompakterade block av bentonitpulver som avses komma till användning för isolering av kapslar med högaktivt avfall [10]. Det innebär att vatten i kontakt med membranet tas upp av granulerna som sväller och reducerar porerna häremellan. Granulernas inre delar får högre densitet än den lergel som fyller porerna och lerkomponenten blir relativt heterogen. Den ringa tjockleken hos lermembranen gör att densitetsvariationer uppkommer både i deras plan och vinkelrätt häremot.

Det starkaste hotet mot lerbaserade topptätningars funktion är stora variationer i densitet genom bristande kontinuitet i såväl mikro- som makroskala. I mikroskala orsakas defekterna av uttorkning och tjälning, eller snarare cykler av uttorkning/bevätning, respektive frysning med islinsbildning omväxlande med upptinande [11]. Defekterna är till dels permanenta då självläkningsförmågan hos lermaterialet är dålig, vilket är fallet med Ca-bentonit. Na-bentonit har betydligt bättre gelbildnings- och självläkningsförmåga, vilket innebär att det är den senare formen som bör användas. I makroskala är effekterna sprickor och förskjutningar, samt kanaler och hålrum.

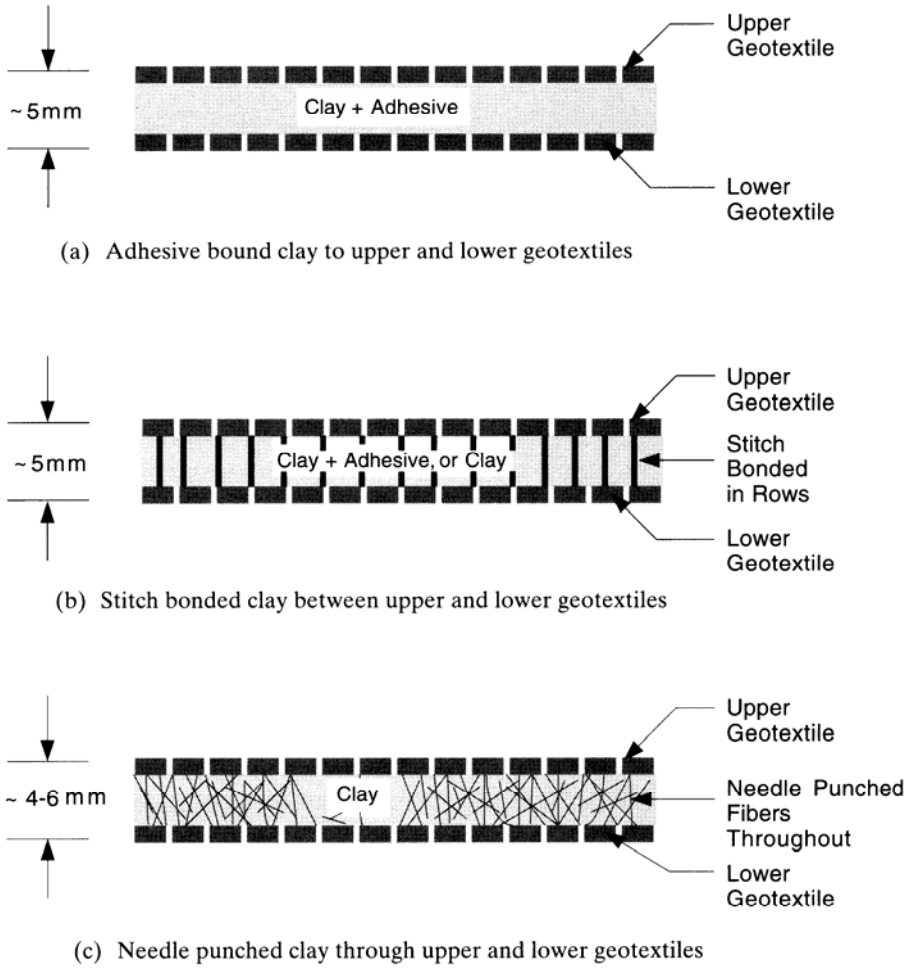
Funktionen hos syntetkomponenten

Syntetkomponenten kan drabbas av defekter som äventyrar membraners tätningsfunktion. Även i intakt form kan den ha betydelse för lerkomponentens beständighet.

I makroskala kan defekter orsakas av mekanisk påverkan i samband med anbringande av lertätningarna och – när det gäller topptätningar - som följd av olikformig sättning hos den täckta avfallsmassan. De tumregler som citeras i litteraturen innebär att fast hushållsavfall komprimeras med minst 10

(+/-5) % av sin tjocklek på 10 till 20 år under egenvikt och överbyggnad [11], vilket innebär att differentialsättningen på överytan av en 20 meter mäktig avfallsmassa kan vara ca 2 meter (se även Avsnitt 4.2.3). Om denna sättningsskillnad är utbildad på en 25 meter lång sträcka blir dragspänningarna i membranet så stora att det kan slitas sönder i fogarna. Det finns litteraturuppgifter om att syntetmembran haft tillfredställande funktion vid så stor töjning (i en riktning) som 10 % [9] men uppgiften är säkerligen inte allmängiltig. Sker deformation i två riktningar som följd av ”kupolbildning” tål sådana membran betydligt mindre töjning.

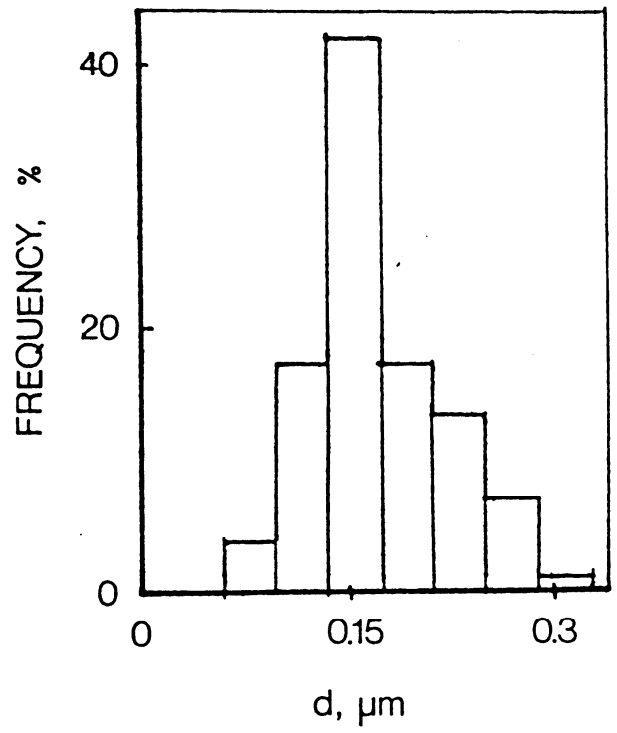
Den mest angelägna funktionen hos syntetkomponenten när det gäller genomsläpplighet är dess förmåga att hålla lerkomponenten på plats, d v s att hindra lerpartiklarna från att pressas eller transporteras ut ur det genomströmmade membranet. Den måste ha sådan filterfunktion att uttransport av lerpartiklar inte äger rum och att en alltför stark expansion av lerkomponenten förhindras. Risken för utpressning av lermaterial genom syntetkomponentens maskor är eliminerad om maskvidden är mindre än ca 100 mikrometer. Fabrikanter av typiska syntetmattor uppger maskvidden vara i området 4 till 500 mikrometer [11].



Figur 3.10. *Tvärsektion genom typiska lermembran [8].*

Genomströmning av lermembran kan ge erosion och uttransport av frigjorda partiklar. För att förhindra denna process krävs mindre maskvidd än som motsvarar partikelaggregatstorleken. I fullständigt dispergerat skick är den enskilda partikelns storlek mindre än ungefär 0,3 mikrometer enligt spektrum i Figur 3.11, men i praktiken är partiklarna aggregerade och det är därför större partikelaggregat som kan lossna och transporteras bort. Enligt nyligen genomförda studier för SKB av typiskt smektitrikt lermaterial har de en storlek av ca 20-50 mikrometer.

Erosionsrisken bestäms av vattenströmningshastigheten, som är en funktion av den hydrauliska gradienten och av hydrauliska konduktiviteten hos lerkomponenten. Den kritiska strömningshastigheten för att lösgöra lerpartiklar med storleken 20-50 mikrometer är ca 10^{-5} m/s [13]. Detta uppnås enligt Darcys lag om den hydrauliska gradienten som verkar över ett membran med medelkonduktiviteten 10^{-8} m/s och tjockleken 0,5 cm är 10^{5}. Det motsvarar ett tryckfall av 5 meter över membranets tjocklek. I praktiken är det osannolikt att gradienten överskrider detta värde, vilket innebär att lösgörande av mindre partiklar än 50 mikrometer knappast sker och att maskvidden hos syntetkomponenten därför inte behöver vara mindre än ca 50 mikrometer.



Figur 3.11 *Storleksfördelningen hos dispergerat bentonitmaterial av typ MX-80. Storleken representerar primärpartiklar bestående av "skiktstackar".*

3.4.3 Lermembrans genomsläpplighet av gas

Erfarenheten visar att gas söker sig genom vattenmättade lermaterial vid ett tryck som högst svarar mot svällningstrycket [7,10]. Det innebär att överbyggnaden, som ju ger ett tryck som ungefär motsvarar topptäckningens svällningstryck, inte kommer att lyftas även om marginalen är liten. Det fordras emellertid att gasflödeskapaciteten måste vara tillräcklig för att hinna släppa igenom gas vid detta tryck. Då så inte varit fallet har man observerat att gas tryckt upp membranet genom överbyggnaden och bildat stora kupolblåsor.

Som visas i efterföljande avsnitt kan svällningstrycket knappast överskrida ca 80 kPa och gas kommer därför att migrera genom ett vattenmättat membran vid ett tryck av storleksordningen 40-80 kPa. För 1 meter överbyggnad är motsvarande svällningstryck ca 20 kPa och gasgenomträngning sker följaktligen vid ett gastryck av storleksordningen 10-15 kPa.

Gasflödet kan, liksom vattenflödet, uttryckas som produkten av genomsläppligheten och den genomströmmade tvärsnittsytan för lermembran i topptäckningar. Gaskonduktiviteten är ca 1000 gånger högre än den hydrauliska konduktiviteten och ger tillräckligt flöde för att hindra gastrycket från att bli kritiskt högt vid en viss högsta gasproduktionstakt. Den måste beräknas för varje enskilt fall och för de fall då takten är för hög måste gasventilatorer anbringas.

3.4.4 Lermembrans svällningstryck

Grundläggande för lermembrans svällningstryck är följande:

1 Lerkomponentens porvattenkemi

2 Funktionen hos syntetkomponenten

De styrande faktorerna exemplifieras här av porvattenkemins betydelse för lerkomponentens struktur och svällningstryck som framgår av Tabell 3.3. När det gäller svällningstrycket finner man att det visserligen är lågt men klart mätbart vid mättnad med elektrolytfattigt vatten också vid mycket låg densitet, medan mättnad med vatten med hög elektrolythalt (>ca 1 viktsprocent) eller dominerat av flervärda katjoner ger total förlust av svällningstrycket. Skillnaden beror på att lerstrukturen är mycket homogen vid låg salthalt medan den koagulerar och krymper vid hög salthalt.

Mättnad med kalciumrikt vatten ger den kraftigaste minskningen av svällningstrycket i enlighet med principerna i Avsnitt 3.2.

Tabell 3.3. *Svällningstrycket hos smektitisk lera med 70-80 % montmorillonit [7]. Det första värdet representerar porvatten med lågt elektrolytinnehåll (sött och svagt bräckt vatten) medan det andra svarar mot vatten med en salthalt motsvarande oceanvatten (Na resp Ca).*

Dominerande katjon	Densitet, kg/m^3	Svälltryck, p_s, kPA	
		sött vatten	salt vatten
Na	1400	100	0
Na	1600	300	40
Na	1800	800	300
Na	2000	4000	4000
Ca	1400	0	0
Ca	1600	20	0
Ca	1800	500	200
Ca	2000	4000	4000

3.5 Funktionen hos lermembran på plats i en deponi

3.5.1 Densitet och tätningsfunktion

Den viktigaste parametern som påverkar lermembrans funktion är densiteten, som bestäms av överlagringstrycket. Man finner med användning av överlagringstrycken i Tabell 3.2 att svällningstrycket hos en bottentätning av smektitrik lera inte kan överskrida ca 1800 kg/m^3, vilket svarar mot en hydraulisk konduktivitet av högst $4 \cdot 10^{-12}$ m/s. För en topptätning kan svällningstrycket knappast överskrida 80 kPa, vilket för natriumbentonit genomströmmad av elektrolytfattigt dagvatten svarar mot en densitet av 1500 kg/m^3 och en hydraulisk konduktivitet i vattenmättat skick av ca $1 \cdot 10^{-11}$ m/s. För en topptätning av kalciumbentonit kan motsvarande densitet, vid tillräckligt effektiv packning, bli 1700 kg/m^3 svarande mot en hydraulisk konduktivitet av ca $5 \cdot 10^{-12}$ m/s. Man finner alltså att det spelar relativt liten roll från täthetssynpunkt om man använder natrium- eller kalciumbentonit eller om elektrolytbetingade förändringar inträffar som följd av genomströmning av avfallsvatten. Risken för permanenta förändringar som följd av cyklisk utttorkning/bevätning och tjälning/upptining gör emellertid att natriumbentonit med sin bättre självläkningskapacitet bör användas.

Erfarenheter från såväl oljeutvinning som avfallsförvaring indikerar att det är gynnsamt om bentoniten initialt väts med sötvatten. Visserligen blir den mera heterogen om saltvatten kommer in i ett senare skede, men den blir ändå mer homogen än om bevätning skett med saltvatten initialt.

Lermembraner som ingår i topptätningar genomströmmas så snart vattentryck börjar verka på deras överyta. Är vattenmättnaden ofullständig sker både vattenupptagning och genomflöde, som äger rum med en hastighet som är ungefär proportionell mot vattenmättnadsgraden. När det gäller bottentätningar är det viktigt att inse att om grundvattenytan i avfallsmassan ligger på samma nivå eller obetydligt högre än i den omgivande jorden så sker ingen

strömning utan all transport av oönskade ämnen från avfallsmassan till omgivningen sker genom diffusion.

3.5.2 Skalberoende

Tätningsfunktionen hos lermembran bestäms primärt av lermaterialets hydrauliska konduktivitet, men detta materials heterogenitet ökar med membranstorleken och tillsammans med inverkan av fogar och skador uppkommer ett skalberoende, d v s stora membranytor har högre genomsläpplighet än små (per ytenhet). Det finns inte något känt samband mellan membranyta och medelvärde och statistisk variation hos hydrauliska konduktiviteten men man inser att en enda lokal bristning hos topp- eller bottentätningar kan ge samma effekt som när proppen dras ur ett badkar. Vattengenomströmningen har då ingenting att göra med den laboratoriebestämda konduktiviteten. Risken för sådana bristningar är stor för tunna membran men är eliminerad vid tillräckligt tjocka bentonitlager[13]. Vikten av att kunna förutse risken för bristningar och kunna välja lämplig lerisolering måste understrykas därför att möjligheten att spåra läckor i en flera år gammal deponi och utsikterna att kunna täta dem är mycket små. I litteraturen beskrivs sätt att beräkna inverkan på tätningsfunktionen av sprickor och hål med antagen eller känd vidd [8,11] men svårigheten att uppskatta sprickstorleken och den påverkan på vattentrycksituationen som defekterna åstadkommer gör att de endast har akademiskt intresse.

3.5.3 Diffusiv transport

Uttransport av oönskade ämnen från en deponi sker förutom genom strömning också av diffusion, som tillsammans med dispersion är den enda transportmekanismen då ingen vattentryckskillnad råder över bottentätningen. Dispersion är en spridningsmekanism, som med hänsyn till svårigheterna att beräkna den, kan inkluderas i diffusiv transport, som bestäms av koncentrationsgradienter. Tunna lerbarriärer, som lermembraner, har praktiskt taget inget diffusionsmotstånd alls medan flera decimeter eller meter tjocka bentonitlager ger mycket långsam diffusiv transport. Vid valet av bottentätning spelar undergrunden en avgörande roll. Om den utgörs av grovkornig jord såsom sand och sandig morän innebär en tunn bottentätning i motsats till en med stor tjocklek att uttransporten av lösta ämnen blir snabb. Om den utgörs av tät lera blir spridningen till omgivningen mycket långsam. I det sistnämnda fallet spelar lerkomponentens tjocklek mindre roll.

3.6 Bentonits kemiska beständighet

Det finns två hot mot bentonits kemiska stabilitet, nedbrytning som följd av lågt eller mycket högt pH-värde hos porvattnet, samt höga temperaturer speciellt i samband med högt kaliuminnehåll. För lägre pH än ca 6 går silikatmineral snabbt i lösning och detsamma gäller vid högre pH än ca 10. Här måste man dock ta hänsyn till att buffringsförmågan är hög om smektitmas-

san är stor som i lager av bentonitrika blandningar av bentonit och ballastmaterial. Sådana isoleringar är därför betydligt mera motståndskraftiga än tunna lermembran. En viktig fråga är vilket smektitmineral som bentoniten utgörs av; montmorillonit, som är relativt stabilt, eller beidellit, som snabbt omvandlas till icke svällande mineral (illit) vid kaliumupptagning t om vid rumstemperatur eller obetydlig uppvärmning. Omvandling till sådana mineral kan ge upphov till en hundrafaldig ökning av genomsläppligheten och total förlust av expanderbarheten och därmed självläkningsförmågan.

För montmorillonitrikt lermaterial kan man använda en termodynamisk modell för beräkning av degraderingsförloppet från 100 % smektit (S) till icke-svällande illit (I) enligt följande [10]:

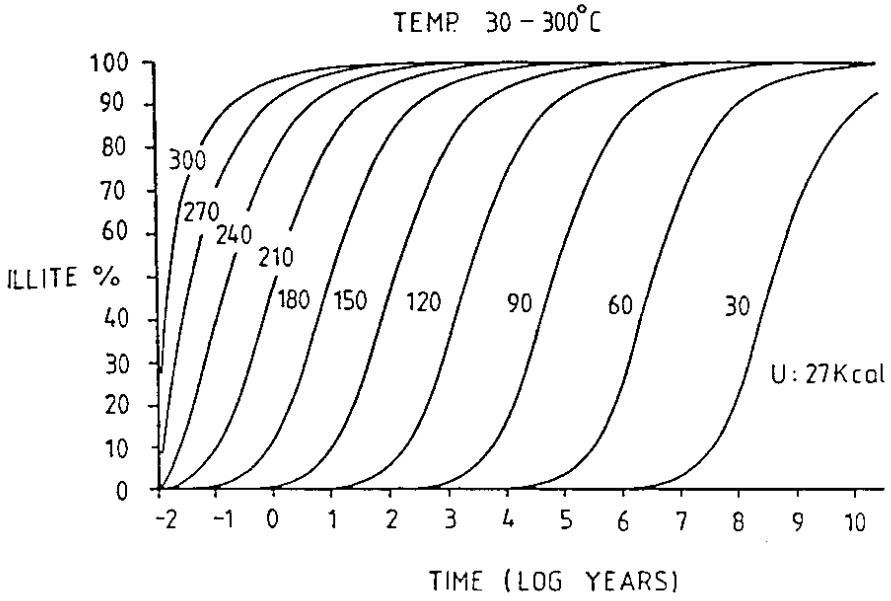
$$-dS/dt = [Ae^{-U/RT(t)}]\ [(K^+/Na^+)mS^n] \qquad (3.1)$$

där:

S = Mol-andelen av smektit i omvandlingsprodukten I/S
R = Allmänna gaskonstanten
T = Absoluta temperaturen
t = Tid
m, n =Koefficienter

Problemet med denna modell är att aktiveringsenergin för reaktionen inte är känd med någon noggrannhet; den antas vanligen ligga mellan 26 och 28 kcal/mol baserat på laboratorieförsök och geologiska evidenser. Kaliuminnehållet är den viktigaste parametern och det är ca 70 ppm för Östersjövatten och 400 ppm för oceanvatten. Figur 3.12 visar temperaturberoendet vid illitisering för aktiveringsenergin 27 kcal/mol och ett högt kaliinnehåll i porvattnet. Diagrammet illustrerar betydelsen av temperaturen genom att endast ca 20 % av smektitinnehållet finns kvar efter 10 år vid 200^{o}C medan nästan 100 % återstår vid rumstemperatur efter en miljon år.

Det inses att för deponier med en temperatur av högst ca 100^{o}C under mindre än 100 år styrs nedbrytningsförloppet hos bentonittätningar främst av pH om bentoniten innehåller smektitvarianten montmorillonit. Man inser också att det är mycket väsentligt att avgöra om bentoniten innehåller en väsentlig mängd beidellit i vilket fall en snabb omvandling till icke svällande mineral, det vill säga illitisering kan komma att äga rum.



Figur 3.12. *Tidsförloppet vid omvandling av smektit (montmorillonit) till illit för aktiveringsenergin 27 kcal/mol. På vertikala axeln anges andelen icke svällande mineral medan horisontella axeln anger tid.*

3.7 Slutsatser och rekommendationer

Utredningen har givit flera resultat av praktisk nytta beträffande lermaterials användning vid isolering av deponier:

1 Topptätningar med lermembran måste skyddas mot tjäle och uttorkning och kan löpa risk att deformeras så mycket att bristningar uppkommer. Om man kan packa avfallsmassan mycket effektivt för att minimera stora differentialrörelser, t ex genom dynamisk djuppackning [8], bör användning av kraftiga, helst flera centimeter tjocka, membran med Na-bentonit kunna erbjuda acceptabel långtidsfunktion eftersom kemisk påverkan på lerkomponenten blir obetydlig.

2 Inläggning av lermembran på olika nivåer för avtätning under ett deponibygge kan användas bara om överfyllning med sand/grus sker till några decimeters höjd för att hindra erosion och begränsa svällningen.

3 Erforderlig släntstabilitet kräver, om lutningen överskrider 6-8^{o}, armering av avfallsmassa och släntöverbyggnad eller utförande av ett stabiliserande erosionsskydd med mot släntfoten ökande tjocklek.

4 Lerisolering i bottentätningar kan i många fall inte utgöras av lermembran därför att tätningsfunktionen blir obetydlig vid genomströmning av avfallsmassans porvatten. För att få låg transmissivitet och låg diffusiv transportkapacitet fordras lerlager med flera decimeters, möjligen meters tjocklek. Lämplig lermaterial för bottentätningar

kan t ex vara Friedland Ton eller liknande naturliga leror med goda packningsegenskaper och låg hydraulisk konduktivitet[13]. Sådana lermaterial, utlagda till någon meters tjocklek, kan också med fördel användas som topptätning eftersom problem med uttorkning och tjälning då kan minimeras.

5 Den kemiska beständigheten bestäms av pH, temperatur och porvattnets kaliuminnehåll. Eftersom temperaturen inte överstiger ca 90 °C under mindre än 100 år blir omvandlingen till icke-svällande mineral liten även vid hög kaliumhalt om bentoniten huvudsakligen består av montmorillonit. Är det fråga om beidellit kan hög kaliumhalt emellertid ge snabb omvandling. Lägre pH än 6 och högre pH än ca 10 kan ses som det största hotet mot bentonitens kemiska stabilitet.

3.8 Referenser

1 Darley H C H och Gray G R, 1991.
Composition and Properties of drilling and completion fluids. Gulf Publishing Company, Houston, Texas. ISBN 0-87201-147-x.

2 Dobiáš B, editor, 1993.
Coagulation and flocculation. Marcel Dekker. New York. ISBN 0-8247-8797-8.

3 Swartzen-Allen L S och Matijevic E, 1976.
J. Colloid Interf. Sci 56:159-167.

4 Egloffstein T, 1995.
Properties and test methods to assess bentonite used in geosynthetic clay liners. International symposium on geosynthetic clay liners, Editors R M Koerner, E Gartung and H Zanzinger, Nürnberg, Germany 14-15 april, 1994. A A Balkema / Rotterdam / Brookfield 1995. ISBN 90 5410 5194.

5 Hasenpatt R, 1988.
Bodenmekanische Veränderungen reiner Tone durch Adsorption chemicher Verbindungen (Batch- und Diffusionsversuche), Mitt. Des Inst für Grundbau und Bodenmechanik der ETH Zürich, Heft no 134.

6 Lummus J L och Azar J J, 1986.
Drilling fluids optimization. Pennwell Books, Tulsa, Oklahoma. ISBN 0-87814-306-8.

7 Pusch R, Muurinen A, Lehikoinen J, Bors J, Eriksen T, 1999.
Microstructural and chemical parameters of bentonite as detrminants of waste isolation efficiency. European Commission, Final Report EUR 18950 Contract No F14W-CT95-0012.

8 Koerner R M, 1998.
Designing with Geosynthetics. Prentice Hall, N.J., USA.

9 Pusch R, 1983.
Stability of bentonite gels in crystalline rock. SKBF/KBS Teknisk Rapport 83-04. SKB, Stockholm.

10 Pusch R, 1994.
Waste Disposal in Rock, Developments in Geotechnical Engineering 76. Elsevier Publ. Co, 1994 (ISBN:0-444-89449-7).

11 Oweis I S, Khera R P.
Geotechnology of Waste Management. PWS Publishing Company (ISBN 0-534-94524-4).

12 Miller C J, Lee J-Y, 1995.
Performance of landfill clay liners under freeze-thaw conditions. Wayne State University (Internal report).

13 Pusch R, 1998.
Backfilling with mixtures of bentonite/ballast materials or natural smectitic clay. SKB Technical Report TR-98-16. SKB Stockholm.

4 KEMISK OCH FYSIKALISK MILJÖ I DEPONIER

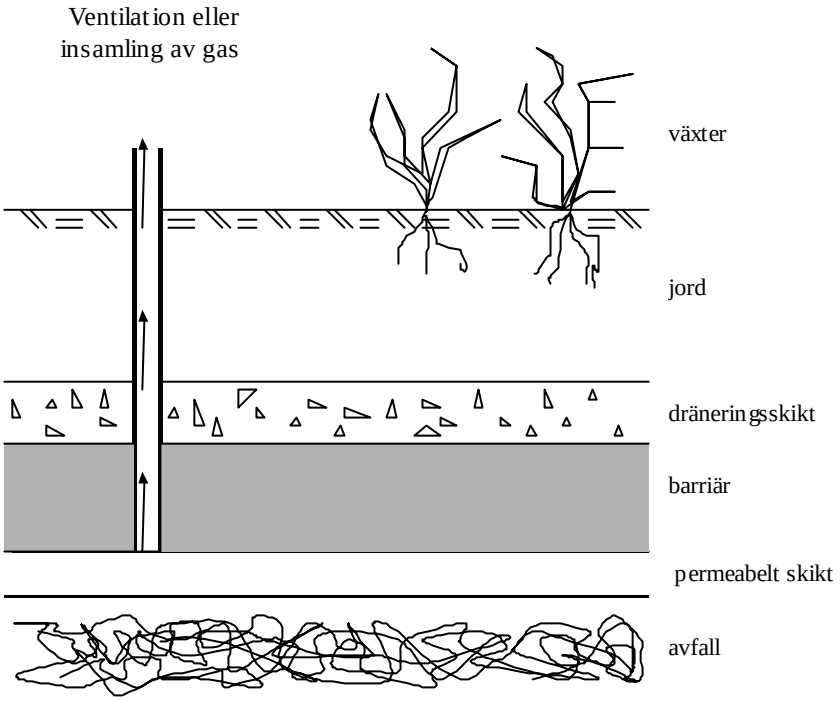
4.1 Inledning

Avfallsupplag intar en särskild plats i ingenjörskonsten genom att de är konstruktioner utan begränsad livslängd. Därigenom kan även processer som på kort sikt kan försummas få en stor betydelse för upplagens funktion. Det som bestämmer upplagens funktion är en kombination av avfall, processer och upplagsteknik. Dessa tre faktorer påverkas och påverkar i sin tur en rad andra faktorer.

Den följande diskussionen fokuseras främst på egenskaper av betydelse för barriärer innehållande bentonit. I avsnitten som följer inledningen behandlas de tre nämnda huvudfaktorerna.

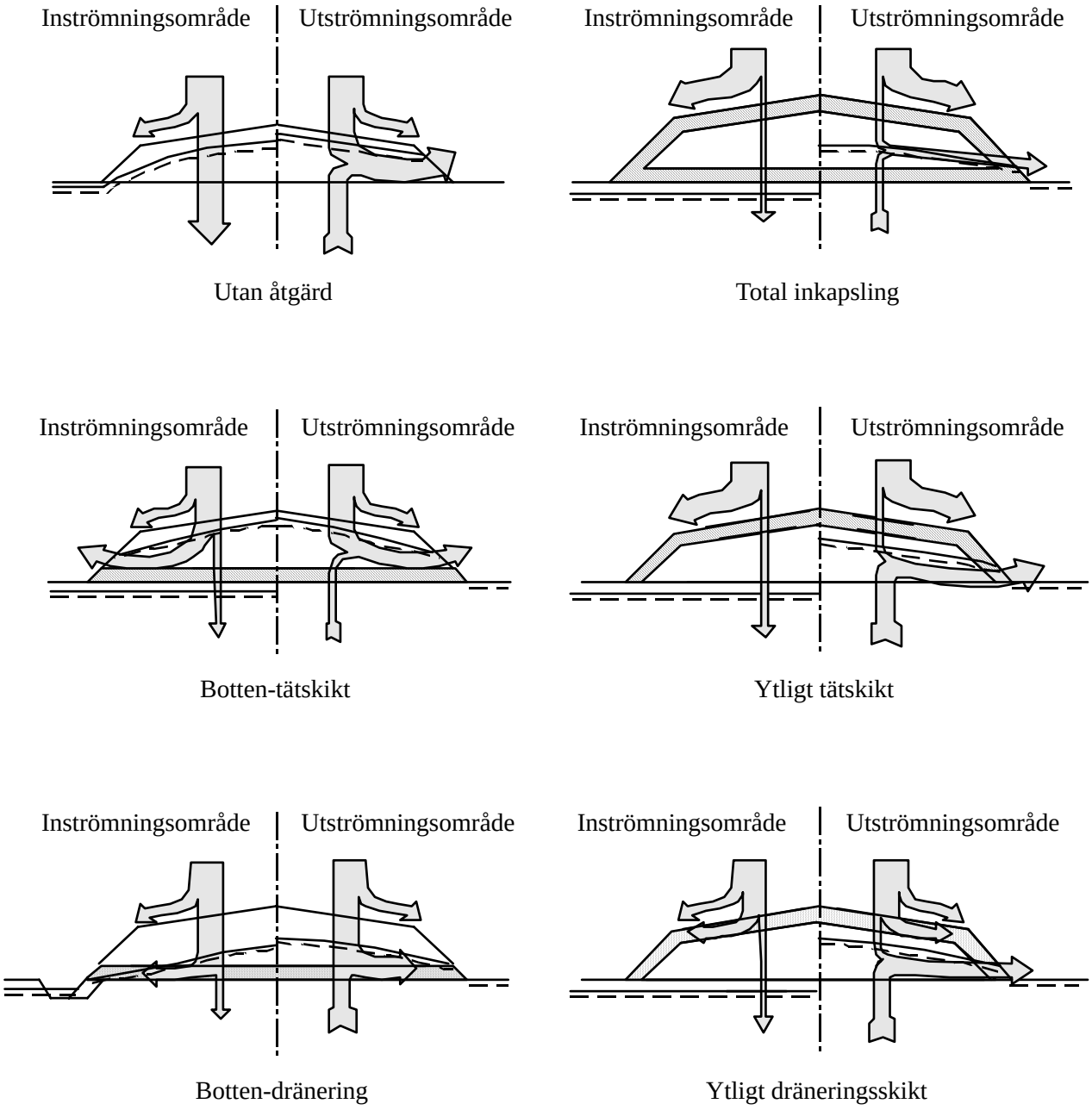
Barriärer vid upplag har till uppgift att förhindra föroreningsspridning från avfallet. Ofta är målet med barriärerna att hålla upplaget hydrauliskt avskilt från omgivningen. Man kan skilja på två typer av barriärer, tätskikt på överytan av upplag och tätskikt i botten på upplag.

Den slutliga täckningen av ett avfallsupplag har till uppgift att reducera mängden syre och nederbörd som infiltrerar ner i avfallet, samt att anpassa upplaget till omgivningens topografi. När så krävs utformas den även för att gas som bildas i upplaget kan ventileras bort eller tas om hand, se Figur 4.1.



Figur 4.1 *Sluttäckning av avfallsupplag i flera skikt, modifierat efter [1].*

Upplagets lokalisering, i ett in- eller utströmningsområde, har betydelse för bottenbarriärens utformning och funktion. I ett inströmningsområde kommer lakvattnet att infiltrera ner i marken och så småningom nå grundvattnet. Bottenbarriärens uppgift är då att reducera mängden lakvatten som infiltrerar ner i marken. I ett utströmningsområde är bottenbarriärens funktion att hindra grundvatten från att komma in i upplaget. I Figur 4.2 visas hur lokalisering och tätskikt påverkar lakvattenbildningen. Normalt används en kombination av dränerings- och tätskikt för att uppnå önskad barriäreffekt.



Figur 4.2. *Inverkan av lokalisering och olika tät- och dräneringsskikt på vattenomsättningen i ett upplag, modifierad efter Lundgren [2].*

Barriärer kan byggas med olika material. Materialen kan grupperas, t ex efter egenskaper (stela/flexibla) eller efter ursprung (naturliga/syntetiska). Vanligen betraktas en låg genomsläpplighet och särskilt då den för vatten (hydraulisk konduktivitet) som den viktigaste egenskapen hos barriärmaterialet. En annan väsentlig egenskap är motståndskraft mot olika kemikalier som bestäms av typen av avfall och de nedbrytningsprocesser som sker i avfallet. Långtidsstabilitet är också mycket viktig. Barriärer ska förhindra att föroreningar sprids så länge avfallet representerar ett hot mot miljön.

Naturliga barriärmaterial är t ex morän, lera och ibland blandningar av dessa. Icke naturliga barriärmaterial är i huvudsak av två typer, geomembran och bentonit/textilmattor.

Naturliga barriärmaterial

Typiska värden på permeabilitet för olika jordar redovisas i Tabell 4.1. Ett vanligt genomsläpplighetsskrav på barriärer är ca 10^{-9} m/s, de material som uppfyller detta kriterium är leriga moräner och leror.

Vid byggande av barriärer med jord är det viktigt att en hög packningsgrad uppnås. Ju högre densitet, desto mindre blir porvolymen där vatten kan transporteras och desto lägre blir genomsläppligheten.

Tabell 4.1 *Överslagsvärden på genomsläpplighet (hydraulisk konduktivitet) för olika jordarter i naturlig lagring.*

Jordart	**Genomsläpplighet [m/s]**
Moräner (välgraderad jord)	
Grusig morän	10^{-5} - 10^{-7}
Sandig morän	10^{-7} - 10^{-8}
Siltig morän	10^{-7} - 10^{-9}
Lerig morän	10^{-8} - 10^{-10}
Moränlera	10^{-9} - 10^{-11}
Sediment (ensgraderad jord)	
Fingrus	10^{-1} - 10^{-3}
Grovsand	10^{-2} - 10^{-4}
Mellansand	10^{-3} - 10^{-5}
Finsand	10^{-4} - 10^{-6}
Grovsilt	10^{-5} - 10^{-7}
Mellansilt-finsilt	10^{-7} - 10^{-9}
Lera	$< 10^{-9}$

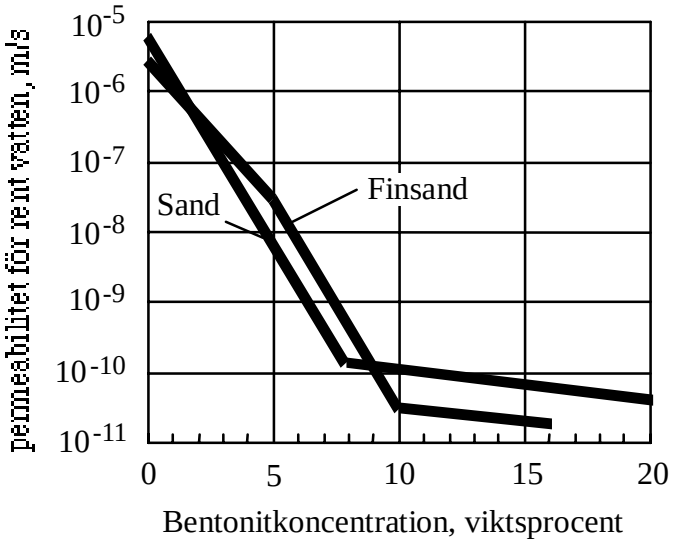
Lera är jord där egenskaperna till största delen bestäms av partiklarna i lerfraktionen. För att en jord ska benämnas lerig, är ett riktvärde att lerhalten ska vara > 20%. För en ren lera ska lerhalten vara > 40%. Lerpartiklar, < 2 μm, består till största delen av lermineral. Typiskt för lermineral är att partiklarna är flata och har negativ laddning på ytan, vilket ger dem förmåga att binda vatten och i vatten lösta joner till sig, se kapitel 3. Det vanligaste mineralet i svenska leror är illit.

Som nämnts i Avsnitt 3 finns det en skaleffekt, det vill säga ett volymsberoende, som beror på variationer i densitet och tätningspåverkan. Dessa orsakas av skillnader i väderlek under byggperioden, störningar på grund av maskinproblem mer mera.

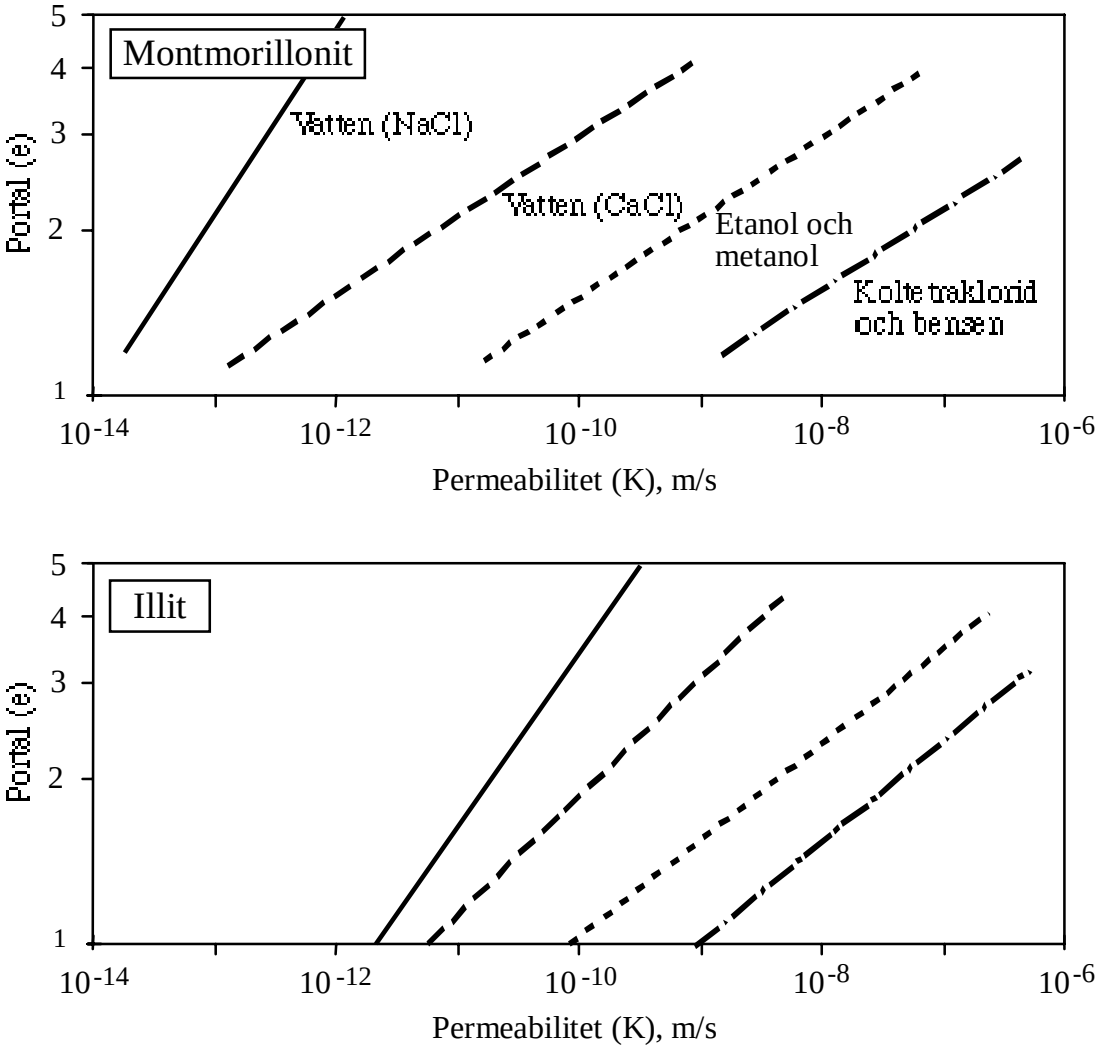
Speciella lermaterial

En lera som ofta används vid barriärbyggnad är bentonit, vilken till största delen består av lermineralet montmorillonit. Montmorillonit karakteriseras av stor specifik yta (800 m^2/g) och stor förmåga att binda vatten till sig. Bentonit som packats till hög densitet har mycket låg hydraulisk konduktivitet, ned till 10^{-13} m/s, se Avsnitt 3.

Har man en undergrund med för hög genomsläpplighet, kan ett alternativ vara att blanda i lera för att minska permeabiliteten. Figur 4.3 visar hur permeabiliteten för rent vatten i en sand förändras vid olika tillsatser av bentonit. Upp till kring 10% inblandning minskar permeabiliteten drastiskt, ca 5 storleksordningar och tillsatser över 10% ger ytterligare minskning. Packningsgraden har en avgörande inverkan på tätheten, se kapitel 3.



Figur 4.3. *Permeabilitet för rent vatten som funktion av inblandad mängd bentonit i sand respektive finsand [3].*



Figur 4.4. *Genomsläpplighet för montmorillonit respektive illit, som packats och perkolerats med olika vätsko.r (Efter [4]).*

Lakvatten från avfallsupplag innehåller en mängd lösta ämnen, vilka kan påverka permeabiliteten hos en lera. Vattnet perkolerar genom en lera i den fria porvolymen, även kallad den effektiva porvolymen. I en vattenmättad lera finns två huvudtyper av porvatten, s k bundet vatten och fritt porvatten, se kapitel 3. Om mängden bundet vattnet minskar, ökar mängden fritt porvatten och därmed genomsläppligheten.

Lakvatten från kommunala avfallsupplag i drift kan beskrivas som anaeroba, neutrala, saltrika vatten, vanligen innehållande relativt höga halter av organiska föreningar. De kan t ex påverka en natriumbentonit med jonbyte vilket ökar genomsläppligheten. Lakvatten kan även ge upphov till utfällningar och därmed minskad genomsläpplighet.

Koncentrerade organiska föreningar kan öka genomsläppligheten drastiskt i en lera, vilket illustreras i Figur 4.4. Resultaten som visas är från försök utförda på illit och montmorillonit där materialen blandats med olika vätskor

och fått konsolidera under olika belastningar (vilket ger olika portal och densitet på proverna). Genomsläppligheten har därefter bestämts för olika vätskor.

Man kan notera att:

- Permeabiliteten varierar med portalet, d v s med densiteten vid mättade förhållanden.
- Tvåvärda joner (Ca^{2+}) ger högre konduktivitet än envärda (Na^{+}).
- Genomsläppligheten för montmorillonit påverkades mest av de olika lösningarna.
- Koltetraklorid och bensen, vilka är opolära organiska vätskor, gav högst konduktivitet. Den kan vara lika hög för illit som för montmorillonit.

Koncentrerade organiska ämnen kan påverka genomsläppligheten hos lera med flera tiopotenser, se kapitel 3.

En rad processer kan tänkas påverka tätskikt innehållande bentonit negativt:

- Torkning/frysning/höga temperaturer
- Differentialsättningar och skred (sättning efter glidplan).
- Organiska ämnen
- Jonbyte/höga salthalter
- Erosion
- Rotpenetrering

I följande avsnitt diskuteras förutsättningarna för dessa processer med utgångspunkt från avfall, processer och upplagsteknik.

4.2 Avfallets egenskaper

Avfallets egenskaper är avgörande för vilka processer som kan uppkomma i upplag. Det är avfallet som fungerar som substrat och energikälla för biologiska och kemiska processer. Omvandling och mobilisering av deponerat avfall leder till att det i upplagens inre uppstår speciella miljöer. Vissa ämnen bildas och lämnar upplaget i gas- och vätskefas.

Gas från avfall

Tätningar innehållande bentonit kan främst förväntas bli påverkade av vätskor, men åtminstone en indirekt påverkan från gas är känd. I bentonitbaserade tätningar av genomföringar i täckskikt, t ex efter installation av gasbrunnar, har uttorkning observerats. Detta kan förklaras med att metanoxidation ägt rum. Den gas som bildas pressar undan porvatten och gör därmed bentoniten genomsläpplig för gas. Metan från upplagets inre möter i täck-

skiktet inträngande syre och oxideras i en mikrobiell process som avger stora värmemängder, drygt 2 MJ/mol metan:

$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$

Temperaturer upp emot 90° C, har uppmätts i och kring avfallsupplag som en följd av metanoxidation. En stark värmetuveckling kan även uppstå vid nedbrytning av avfallet självt, mer om detta i Avsnitt 4.3.

Om avfallet innehåller organiskt material som är nedbrytbart under anaeroba förhållanden finns förutsättningar för att metanoxidation med åtföljande uttorkningsrisk skall uppträda. Det är främst topptätningar som kan påverkas. Även bottentätningar kan påverkas i de fall där felaktigt konstruerande lakvattendräneringar medger intransport av luft vid upplagets bas eller sida. Topptätningar kan även påverkas direkt av gasbildningen om den kan leda till uppbyggnad av höga tryck. I nedbrytningsförsök med täta material (muddermassor från Hamburgs hamn) har tryck upp till tre atmosfärer uppmätts. Det krävs mycket speciella omständigheter för att så höga tryck skall kunna byggas upp vid upplag byggda över befintlig mark. Däremot är det inte orimligt att en tryckuppbyggnad upp emot och över den nivå som motsvaras av den last som ett täckskiktet representerar, kan uppkomma.

En annan påverkan från gasbildning är karbonatbildning. I runda tal hälften av bildad gas kommer att vara koldioxid, som följaktligen kommer att ha ett partialtryck kring 0,5 atmosfärer.

Ser man till vilka avfallstyper som deponeras på svenska upplag under de senaste åren, Tabell 4.2, kan man konstatera att de flesta kan ha gasbildningspotential. Potentialen varierar dock kraftigt mellan olika avfall – den är störst för hushållsavfall och vissa industriavfall relativt liten för askor. Det kan emellertid inte utan vidare antas att en låg gasproduktion är det gynnsammaste för barriärkonstruktionen. I de fall där en blandmiljö mellan anaeroba och aeroba förhållanden kan uppstå på djupet i ett upplag finns nämligen en potential för metanoxidation även längre ned i upplaget. I Tabell 4.2 har avfall med gasbildningspotential markerats med kursiv text.

I Tabell 4.3 redovisas kol, syre och väteinnehåll i några av de mest betydande nedbrytbara avfallen. Av sammansättningen kan man utläsa att en avsevärd reduktionskapacitet (COD, oxtal, syreförbrukning) finns för de flesta avfallen, däremot kommer den knappast att realiseras för material som trä, textil, plast och gummi under deponibetingelser.

COD-halten, d v s syreförbrukningen vid oxidation med dikromat, kan överslagsmässigt översättas i metanbildning med relationen COD = 4 ggr CH_4. Exempelvis kan matavfallet ovan förväntas ge ca 0,35 g CH_4 per gram nedbruten torrsubstans, TS, eller knappt 0,5 m^3/kg nedbruten TS. Vid nedbrytningen bildas även CO_2, mängden kan skattas ur oxidationstalet, den är lika stor som metanmängden vid oxidationstalet 0 och hälften av metanmängden vid oxidationstalet 2. Däremellan kan man interpolera linjärt.

Tabell 4.2. *Avfall tillfört svenska avfallsupplag (kton/år).Avfallsslag med gasbildningspotential är markerade med kursiv text.*

Avfallsslag	**1994**	**1995**	**1996**	**1997**
Hushållsavfall och jämförbart	1 380	1 200	1 110	1 150
Park och trädgårdsavfall	80	60	70	50
Bygg- och rivningsavfall	900	950	885	700
Avfall från energiutvinning	660	680	700	675
Kommunalt avloppsslam	610	540	470	455
Industriavloppsslam	190	190	205	210
Icke branschspecifikt industriavfall	1 060	1 120	1 050	970
Branschspecifikt industriavfall	490	470	435	405
Mineralåtervinningsavfall		10	1	2
Specialavfall	90	120	130	133
Annat	620			

Tabell 4.3. *Makroelement i några organiska avfall. Modifierad efter [5].*

Avfallsfraktion	**Rest**	**Halt kol**	**Halt väte**	**Halt syre**	**C-Ox-ida-tionstal**	**COD [mg O2]**
	% av TS	**moler / kg**	**moler / kg**	**moler / kg**	**[-]**	**g/g TS**
Blandat hushållsavfall	30,5	29,8	47,7	16,8	-0,48	1,07
Kartong	2,8	38,3	63,6	27,7	-0,21	1,29
Tidningspapper	2,0	40,7	62,6	26,5	-0,24	1,38
Bestruket papper	15,7	32,7	54,6	24,5	-0,17	1,09
Annat papper	11,8	35,1	57,6	24,3	-0,26	1,20
Plast	9,9	55,3	91,4	5,9	-1,44	2,41
Gummi och läder	24,9	39,9	59,6	8,1	-1,09	1,62
Trä	3,4	40,8	59,6	25,8	-0,20	1,37
Textil	2,7	41,3	66,5	22,6	-0,52	1,49
Trädgårdsavfall	18,3	35,3	52,6	19,9	-0,36	1,23
Matavfall	12,3	37,3	64,5	20,2	-0,65	1,39

3 Utlakning från avfall

De ämnen som kan påverka bottentätningar är vanligen salter och andra vattenlösliga ämnen, men det kan även förekomma höga halter av opolära organiska ämnen, dels resulterande från nedbrytning av organiska avfall, t ex alkoholer och organiska syror och dels direkt mobiliserade från speciella avfall, t ex lösningsmedel och färger. I Tabell 4.4 visas ett urval av observerade halter av organiska ämnen i lakvatten från hushållsavfall.

Termerna acidogent och metanogent refererar till lakvatten från olika upplagsmiljöer vilka beskrivs närmare i Avsnitt 4.3 nedan. Det är främst under acidogena förhållanden som fettsyror och alkoholer kan förväntas nå sådana

halter att en påverkan på bentonit kan bli märkbar. För lättlösliga saltjoner som klorid spelar nedbrytningstillståndet en underordnad roll för utlakningen, dessa ämnen tvättas helt enkelt ut ur avfallet och lakvattenhalterna beror huvudsakligen av halten i avfallet och den mängd vatten som passerat avfallet, d v s den s k L/S-kvoten (liquid/solid-kvoten [kg vatten/kg TS avfall], se även Avsnitt 4.3). Koncentrationerna i lakvatten av dessa ämnen är som högst i det första lakvattnet som lämnar upplaget och sedan avklingar halterna exponetiellt.

Tabell 4.4. *Exempel på observerade halter av olika organiska ämnesgrupper i lakvatten från deponier innehållande hushållsavfall.*

Typ av ämne(n)	**Koncentration**	**Typ av lakvatten**	**Referenser**
Fettsyror	1-22 g/l	acidogent	[6]
Alkoholer	46,8 g/l		[7]
Protein	0,5 g/l 0 g/l	acidogent metanogent	[8] [8]
Aminosyror	264 mg/l		[7]
Bensen	<0,001-7,4 mg/l		Shuckrow 1980 ur [9]
Halogenerat material (AOX)	0,13-1,3 mg/l		[10-11]
Olja och fett	<0,5-3,3 mg/l	metanogent	[12]
Fenoler	<0,003-17 mg/l		Shuckrow 1980 ur [9]

Det är främst fettsyror och alkoholer som kan förväntas nå sådana halter att en påverkan på bentonit kan bli märkbar.

Bland de ämnen i hushållsavfall som lätt mobiliserbas genom utlakning märks främst organiskt material, kväve och klor. De halter som brukar vara dimensionerande för lakvattenbehandling är främst innehållet av organiskt material och kväve. I Tabell 4.5 visas en sammanställning av prognoser för utlakning av dessa ämnen. Utlakning diskuteras vidare i Avsnitt 4.3. I tabellen angiven bildnings- eller mobiliseringspotential utgör en extrapolation av total utlakbart material baserat på diverse utlakningstester, halveringstiden är den tid som krävs för att uppnå hälften av utlakningspotentialen, under antagandet att infiltrationen är ca 250 mm per år. I tabellen återfinns även en skattning av den tid som åtgår innan lakvattenhalterna kommer att understiga angivna gränsvärden. Halten organiskt material (BOD, TOC) i lakvatten är starkt beroende av nedbrytningstillståndet, och kan variera 1-2 storleksordningar beroende på detta. Kloridhalten är, som tidigare nämnts oberoende av detta och halten av olika kväveinnehållande

ämnen intar en mellanställning. Halten AOX (adsorberbara halogenerade kolväten) påverkas även av nedbrytningstillståndet i upplag, men vanligen i mindre utsträckning än organiskt material generellt.

Tabell 4.5. *Jämförelse av prognosticerade utlakningstakter för några huvudkomponenter i upplag med blandat kommunalt avfall. (Gränsvärden: COD = 200 mg/l; N_{Kj}/NH_4-N/ $N_{tot.}$ = 5 resp. 10 mg/l; Cl = 100 mg/l; Adsorberbara (på aktivt kol) halogenerade kolväten, AOX = 0,5 mg/l). Efter [13].*

Ämne	Referens	Mobiliserings-potential [g/kg TS]	Halverings-tid $T_{½}$ [år]	Tid till gränsvärde [år]
TOC/	[14]	4,2 - 14,2	97 - 328	500 - 1.700
COD	[15]	3,0	54	280
	[16]	-	-	232[3]
	[17]	2,5 - 11,2	-	65 - 320
	[18]			
	[19]	1,8 - 8,4	25 - 96	80 - 360
N_{Kj}[1]/	[14]	0,2 - 0,3	7 - 11	55 - 80
$N_{tot.}$/	[20]	2,2	113	815
NH_4	[21-22][2]	10,7	940	700 (2 400)[3] (*)
	[17]	1,4 - 3,4	-	decennier till sekler
	[18][4] (95)	0,15	-	(5)[4]
	[19]	1,2 - 4,1	40 - 150	120 - 450
Cl	[14]	1,0 - 1,5	27 - 42	100 - 150
	[20]	2,5	43	210
	[17]	0,9 - 1,8	-	25 - 130
	[19]	0,9 - 4,1	40 - 90	90 - 250
AOX	[14]	-	-	-
	[20]	0,009	178	-
	[17]	0,002 - 0,022	-	40 - 100
	[16]	-	-	208[4]
	[19]	0,0013 - 0,0032	10 - 80	30 - 210

* Potentialer och tider beräknade ur L/S-kvot 100
1 Kväve enligt Kjeldahl
2 Kväve totalt; gränsvärde $N_{tot.}$ = 10 mg/l
3 Upplagssimulatorer; Värde i parentes: Fältexperiment (3 m^3 Testcell)
4 Uppmätt utlakning efter 5 år.

Tabell 4.6. *Variation av egenskaper hos några industriavfall.*

Variabel [dimension]	**Uppmätta värden**	
	Lägsta	**Högsta**
Partikelstorlek [mm]	<0,001	300
Fukthalt[1] [g/kg]	0	998
Flyktiga ämnen, VS, (vid 775 °C) [g/kg TS]	0	686
pH [-]	4.5	>14
Eh [mV]	-300	300
Densitet [kg/m^3]	200	4 300
Utlakbarhet enligt DIN-test* [g löst/kg avfall]	< 6	165
Gasbildning vid vätning [m^3/kg]	0	0.3
Biologisk gasbildning [m^3/kg VS]	0	> 0.1
Kvävehalt [g/kg]	0	2
Cd + Cr + Pb + Hg [g/kg]	0,001	1,4

* se text

Avfall från industri och på olika sätt uppkomna, speciella avfall, kan ge upphov till både gas och lakvattenemissioner som skiljer sig markant från vad som ovan sagts om blandat kommunalt avfall.

Detta illustreras av Tabell 4.6 där variationen i materialegenskaper hos ett trettiotal branschspecifika industriavfall har sammanställts [23]. Bland de tabellerade egenskaperna kan framförallt gasbildning vid bevätning och utlakning av höga salthalter vara potentiellt störande för bentonitkonstruktioner. Bland de gaser som kan bildas vid bevätning av material finns vätgas, acetylen, ammoniak och metan; samtliga oxiderbara och explosiva ämnen.

Till de saltrika materialen hör askor och olika filterstoft. Enligt DIN 38414-4-testet lakas avfallen med en vattenmängd motsvarande 10 gånger avfallsmängden och därvid kan halten lösta salter nå upp emot ett par procent, d v s 20 g/liter. (jämför med totalt utlakade mängder i Tabell 4.6).

I deponier kan ännu högre salthalter uppnås, särskilt initialt, eftersom det första lakvattnet har en lägre L/S-kvot. I Tabell 4.7 visas en sammanställning av lakvattendata från slagg- och askdeponier, maxhalter på över 100 gram klorid per liter har observerats från upplag med flygaska från avfallsförbränning.

[1] Fukthalt = vattnets massa/totala massan. Ibland används fuktkvot = vattnets massa/torrsubstansens massa. 1/fukthalten = 1 + 1/fuktkvoten.

Tabell 4.7. *Högsta halter av ett antal ämnen i lakvatten från flygaska och bottenaska från sopförbränning. Data från [24]*

Typisk maxhalt i lakvatten	**Sopslagg**	**Flygaska**
>100 g/l		Cl, Ca
10-100 g/l		Na, K, Pb
1-10 g/l	SO4, Cl, Na, K, Ca	Zn
100-1000 mg/l	NVOC*, NH4-N	NVOC*, SO4
10-100 mg/l		
1-10 mg/l	Cu, Mo, Pb	Cu, Cd, Cr, Mo
100-1000 µg/l	Mn, Zn	As
10-100 µg/l	As, Cd, Ni, Se	
1-10 µg/l	Cr, Hg, Sn	
< 1µg/l		Hg

* icke flyktigt organiskt kol

Vid sidan av nedbrytbarhet och lakbarhet kan avfallens mekaniska egenskaper vara viktiga för tätskikts funktion. Dels kan sättningar, i synnerhet differentialsättningar, ge skador på topptätningar, dels påverkas miljöns utveckling av hur gas och vätska kan röra sig i materialet. Täta material kommer att gynna anaeroba förhållanden och har en högre vattenhållande förmåga, vilket minskar risken för uttorkning.

Riskerna för differentialsättningar kan reduceras genom att material med olika sättningsegenskaper hålls isär, men även relativt homogena material som flygaskor kan ge upphov till stora differentialsättningar genom utlakning och erosion eftersom vatten tenderar att röra sig huvudsakligen i vissa stråk. Variationer i densitet som följd av olikheter i packning kan förstärka effekten.

Blandade kommunala avfall innehåller material av skiftande komprimer- och nedbrytbarhet, vilket kan leda till sättningar på ca 30%, varierande med initial packning. I Figur 4.5 visas ett exempel på hur sättningar kan variera i tid och längs en linje över ett upplag med välkompakterat och relativt homogent hushållsavfall.

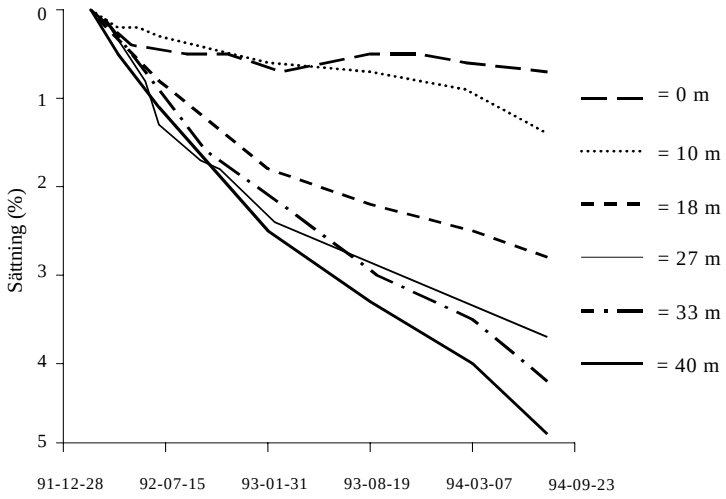
De avfall vars egenskaper sammanfattats i Tabellerna 4.6 och 4.7 har mycket olika komprimerbarhet, se Tabell 4.8. Densiteterna varierar mellan 0,2 och 1,7 ton /m^3 för okompakterade avfall. Vissa avfall är närmast okomprimerbara medan andra trycks samman till mindre än halva ursprungsvolymen. Likaså varierar den vattenhållande förmågan från drygt tio procent till nästan tre gånger avfallets vikt.

Tabell 4.8. *Kompaktdensitet, och skrymdensiteter hos några industriavfall [23].*

Avfall, sats nummer	Kompakt-densitet ton / m^3	Skrymdensitet, ton / m^3								Fält-kapacitet, kg H_2O / kg TS
		Okompakterat		Kompakterat vid olika vertikala laster						
		torrt	vått	10 kPa	20 kPa	40 kPa	80 kPa	160 kPa	320 kPa	
1	2,24	1,27	1,22	1,22	1,22	1,23	1,24	1,26	1,29	0,34
2	2,61	1,44		1,58	1,59	1,60	1,61	1,64	1,69	
3	2,72	0,35	0,59	0,57	0,59	0,62	0,68	0,72	0,78	0,96
4	2,24	1,45		1,09	1,10	1,11	1,14	1,18	1,22	0,13
5a	2,38	1,69								
5b	2,71									
6	1,29		0,31	0,35	0,37	0,39	0,44	0,50	0,53	2,35
8	1,12									
10		0,33		0,20	0,22	0,24	0,26	0,30	0,38	
14	2,49	0,94	0,88	0,97	0,98	0,99	1,00	1,03	1,06	0,64
15	2,03-2,42	1,03	0,72	0,87	0,89	0,91	0,94	0,98	1,05	0,83
16	2,08	1,37	0,87	0,52	0,53	0,55	0,57	0,59	0,62	0,67
17	2,51-2,97	1,06	0,82	0,82	0,84	0,86	0,88	0,92	0,97	0,78
19	2,65	0,89	0,46	0,53	0,55	0,61	0,68	0,75	0,82	1,27
20	2,40	0,34	0,50	0,34	0,36	0,39	0,42	0,47	0,52	1,35

Tabell 4.8, fortsättning. *Kompaktdensitet, och skrymdensiteter hos några industriavfall [23].*

Avfall, sats nummer	**Kompakt-densitet ton / m^3**	**S k r y m d e n s i t e t, ton / m^3**								**Fält-kapacitet, kg H_2O / kg TS**
		Okompakterat		**Kompakterat vid olika vertilaka laster**						
		torrt	**vått**	**10 kPa**	**20 kPa**	**40 kPa**	**80 kPa**	**160 kPa**	**320 kPa**	
21				0,42	0,43	0,45	0,48	0,53	0,60	
23	2,36	0,23	0,29	0,32	0,32	0,32	0,33	0,35	0,36	2,84
24	2,19	0,19	0,42	0,36	0,37	0,38	0,41	0,45	0,51	1,77
25	1,13			0,23	0,28	0,34	0,44	0,47	0,45	
26	2,22	0,37	0,37	0,52	0,55	0,62	0,69	0,78	0,83	2,09
28	2,33		0,25	0,36	0,38	0,39	0,41	0,42	0,45	0,50
medel-värde, alla	2,22	0,86	0,59	0,63	0,64	0,67	0,70	0,74	0,79	1,18



Figur 4.5. *Sättning av en upplagsyta längs en linje från invallning och ut mot mitten av en avfallscell. Avfallet bestod till 87 % av hushållsavfall och resterande av lätt industriavfall. Upplagd densitet var ca 0.8 och fyllnadshöjden var 10 meter. [25].*

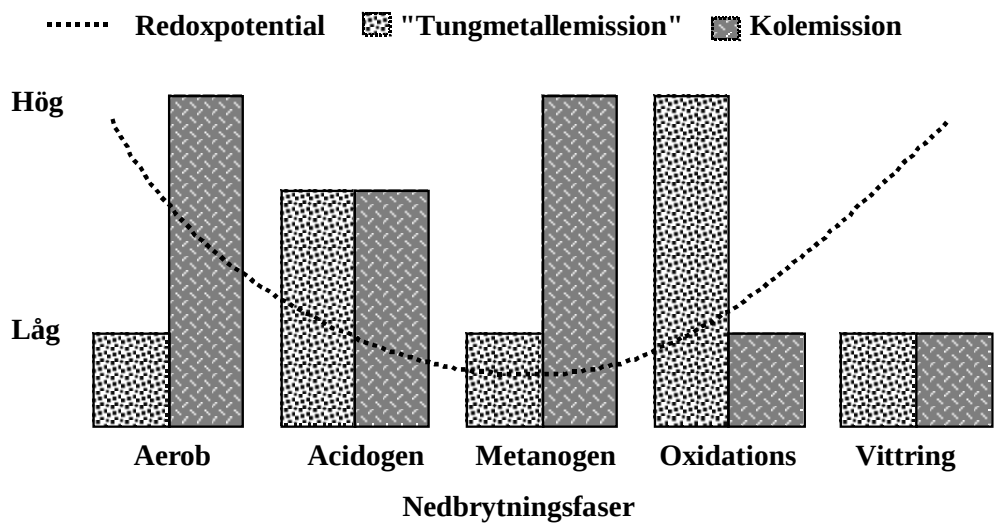
4.4 Upplagsprocesser

Upplagt avfall kan omvandlas kraftigt och relativt snabbt genom påverkan av mikroorganismer. De viktigaste förutsättningarna för detta är tillgång till ämnen som kan ge mikroorganismer energi för tillväxt samt tillräckligt med vatten. För blandade kommunala upplag styrs uvecklingen av den interna upplagsmiljön undantagslöst av mikrobiell nedbrytning.

Utvecklingen brukar beskrivas i termer av avfallsupplagens olika nedbrytningstillstånd eller nedbrytningsfaser. Det senare begreppet används synonymt med det första men implicerar även det faktum att nedbrytningstillstånden vanligen följer i en bestämd sekvens. Bland viktiga bidrag till kunskapsutvecklingen om upplagens nedbrytningstillstånd kan nämnas [26] (gashalternas utveckling), [27] (lakvattenhalternas utveckling), [28] (omsättning av organiskt material) samt [29] (lakvatten och gas).

Inledningsvis domineras upplagets miljö av det organiska materialets omvandling och nedbrytning i tre karakteristiska nedbrytningsfaser; aerob-, sur anaerob- (acidogen) och fullständig anaerob (metanogen), nedbrytningsfas. Dessa nedbrytningstillstånd kan observeras i fält och vid simuleringar i laboratorium[29].

I Figur 4.6 presenteras olika nedbrytningsfaser med utgångspunkt från sina emissioner och sin redoxmiljö. Schematiskt avlöser nedbrytningsfaserna varandra från vänster till höger.



Figur 4.6. *Nedbrytningsfaser i upplagsmiljö karakteriserade av intensiteten i avtappningen av upplagens kolinnehåll samt "tungmetaller".*

En rätt homogen bild kan sammanfogas av de inledande nedbrytningsprocesserna i avfallsupplag som dominerade av olika mikrobiellt katalyserade reaktioner vilka ger en karakteristisk kemisk/fysisk miljö. Vid sidan av de resulterande emissionerna kan även miljöerna karakteriseras med utgångspunkt från värmealstring, pH och redoxpotential, vilket visas i Tabell 4.9.

Tabell 4.9. *Karakteristiska egenskaper hos de inledande nedbrytningsfaserna i upplagt hushållsavfall.*

Nedbrytningsfaser	**Värme-utveckling**	**pH**	**pE**
Aerob nedbrytning	hög	≈ 8	≈ 12 - 14
Sur nedbrytning	låg	≈ 5	≈ -2 - -4
Metanogen nedbrytning	låg	≈ 7	≈ -4 - -7

Av särskilt intresse för funktionen hos tätskikt med bentonit är värmeutvecklingen under aerob fas (upp emot 80 °C), den höga halten lösta ämnen, och särskilt innehållet av organiska ämnen, under den acidogena fasen, samt gasbildningen under metanogen nedbrytning.

Till de tre första biogena nedbrytningsfaserna kan det fogas ytterligare en; oxidationsfasen. Under metanbildningsfasen har förhållanden rått som gynnar bildandet och anhopningen av utfällda metallkomplex som sulfider, hydroxider och karbonater. Efter det att substratet för gasbildning har konsumerats kan luft ånyo tränga in i upplaget och där reagera med de reducerade föreningar som ackumulerats under upplagets anaeroba faser. Redan låga syrgastryck skapar förutsättningar för en mikrobiellt katalyserad oxidation av sulfider t ex pyrit av *Thiobacillus ferrooxidans* [30].

Med svaveloxidationen följer även en pH-sänkning som i sin tur påverkar stabiliteten hos hydroxider och karbonater och som bör öka halten lösta metaller. För att undvika denna emissionsstegring är det förmodligen viktigare att begränsa syreinträngningen än att - som nu är vanligt - sträva efter att hålla vatten ute. Det finns dock inga observationer på "moderna upplag" som har nått denna fas av sänkt pH och ökad metallupplösning. Enstaka laboratorieförsök [31], har gett indikationer på att detta kan inträffa och det verkar dessutom rimligt att oxidation av reducerade metallkomplex skall leda till förhöjda metallfrakter. Hur stark effekten blir beror bl a på svavelhalten i upplaget.

När slutligen alla koncentrerade energidepåer i upplaget har förbrukats återstår fortfarande betydande koncentrationsgradienter mellan upplaget och dess omgivning. En långsam spridning kommer därför att vidta. Vid sidan av koncentrationsgradienterna och upplagets konstruktion är klimatfaktorer bestämmande för spridningshastigheten. Denna sista fas kan kallas för upplagets vittringsfas.

Typisk tidsdräkt kan vara veckor för den första fasen, månader till något år för fas två, och något till några decennier för den tredje fasen. För oxidationsfasen finns inte resultat tillgängliga för en skattning av ens ett grovt tidsintervall. Vittringsfasen slutligen kommer att fortgå så länge upplaget består och kan påverkas av väder och vind.

Nedbrytningsfaserna och deras inbördes ordning kan förstås från det energiutbyte som mikroorganismer har ur de olika reaktioner som listats i Tabell 4.10.

De reaktioner som erbjuder mest energi kommer att dominera över övriga processer och därför kommer alltid aerob omsättning av dominera så länge fritt syre finns tillgängligt. Efter det att syrehalten har reducerats kraftigt kommer andra oxidationsmedel som nitrat, metalloxider och sulfat att dominera, innan fermentation och metanbildning tar vid. Som framgår av tabellen är protonreduktion inte möjlig under standardbetingelser, för att den skall inträffa måste vätgastrycket hållas lågt, t ex genom metanbildning.

Den nedbrytningsfas som förmodligen är mest kritisk för bentonitliners vid upplag med organiskt avfall är den acidogena. I Tabell 4.11 visas typiska koncentrationer för ett antal ämnen som ofta dominerar lakvattensammansättningen från acidogena upplag.

Tabell 4.10. *Fri energi (ΔG°') och redoxpotential (Ehº') för några mikrobiellt katalyserade reaktioner [25]*

Reaktion	**Reaktionsformel**	**Δ G°', kJ/(mol e^-)**	**Ehº', mV**
Aerob respiration	$(CH_2O) + O_2 = CO_2 + H_2O$	-117,5	810
Denitrifikation	$(CH_2O) + 4/5\ NO_3^- + 4/5\ H^+ = CO_2 + 2/5\ N_2 + 7/5\ H_2O$	-112,0	750
Nitratereduktion (ammonifiering)	$(CH_2O) + 1/2\ NO_3^- + = CO_2 + 1/4\ NH_4^+ + 1/2\ H_2O$	-74,0	360
Järn (III) reduktion	$(CH_2O) + 2\ FeOOH\ (s) + 6\ H^+ = FeCO_3 + 3\ Fe^{2+} + 6\ H_2O$	-24,3	-100
Fermentation	$(CH_2O) = 1/3\ CO_2 + 1/3\ (C_2H_6O)$	-23,4	-180
Sulfatreduktion	$(CH_2O) + 1/2\ SO_4^{2-} + 1/2\ H^+ = CO_2 + 1/2\ HS^- + H_2O$	-18,0	-220
Metanbildning	$(CH_2O) + 1/2\ CO_2 = CO_2 + 1/2\ CH_4$	-16,3	-250
Protonreduktion	$(CH_2O) + H_2O = CO_2 + 2\ H_2$	+3,8	-420

Tabell 4.11. *Lakvattensammansättning under acidogena förhållanden. Resultaten avser mg/l, utom för pH och BOD/COD. Intervallen baseras på [32-33].*

	Medel Tyskland [34]	**Medel Storbritanien [35]**	**Medel [36]**	**Intervall**
pH	6,1	6,7	5,6	4,5 - 7,8
BOD5	13 000	18 632	19 940 *	4 000 - 68 000
COD	22 000	36 817	31 710	6 000 - 152 000
TOC	-	12 217	9 690	1 010 - 29 000
BOD/COD	0,58	0,51 †	0,63 †	-
VFA (COD-eq)	-	-	25 000	-
VFA (TOC-eq)	-	8 197	7 860	963 - 22 414
SO_4	500	676	-	<5 - 1 750
Ca	1 200	2241	1 406	10 - 6 240
Mg	470	384	204	25 - 1 150
Fe	780	654	228	20 - 2 300
Mn	25	33	20	0,3 - 164
Zn	5	17	18	0,1 - 140

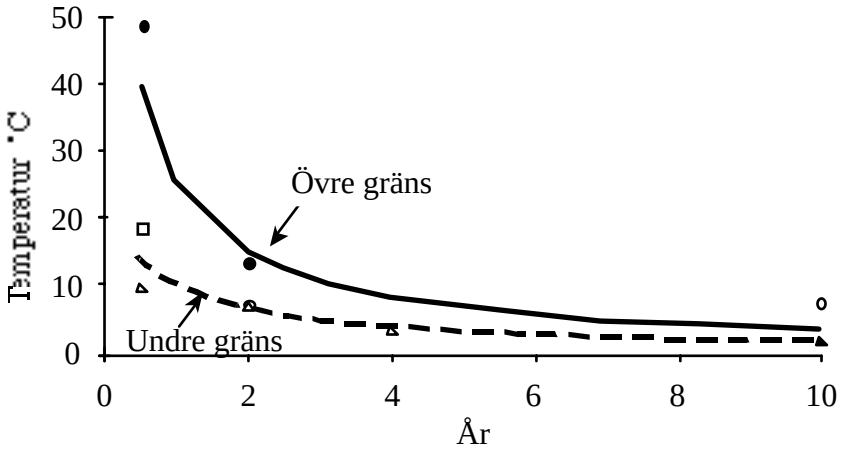
* BOD_7

† beräknat ur medeltal för BOD och COD.

Vanligen är klorid den anjon som förekommer i högst koncentration i lakvatten från hushållsavfallsupplag, och under upplagets första år kan man i outspätt lakvatten finna 1-3 g klorid per liter. Halten avklingar i takt med att vatten passerar genom det deponerade avfallet, d v s med ökande L/S-kvot (liquid/solid-ratio, kg vatten/kg avfall) sjunker kloridhalten. Reizel et al. (1992) fann att kloridhaltens avklingning kunde beskrivas väl av exponentialfunktionen: C = 1614 exp(-0,908X), där C är koncentrationen av klor i lakvatten (mg/l) och x är L/S-kvoten. Liknande samband kan användas för att beskriva avklingningen av de lakvattenkomponenter som nämns i Tabell 4.11, men utlakningen av dessa påverkas även starkt av andra faktorer än L/S-kvoten, exempelvis kan nedbrytning och adsorption påverka utlakningen.

Vid sidan av utlakning och gasbildning kommer särskilt aerob nedbrytning att ge upphov till stark värmeutveckling vilket illustreras i Figur 4.7. De där redovisade temperaturförloppen återspeglar övergången från aerob till anaerob nedbrytning under upplagets första år (inklusive uppbyggnaden). Under förutsättning att tillräcklig intransport av syre kan ske kommer motsvarande uppvärmning även att kunna ske i ett senare skede.

Under vissa förhållanden kan betydligt högre temperaturer uppkomma i upplag, dels till följd av aerob omsättning, dels i samband med vätning. Exempelvis har temperaturer kring 80 °C observerats i en deponicell med lågkompakterat hushållsavfall [25]och temperaturer nära kokpunkten vid vätning av katodrester från aluminiumproduktion.



Figur 4.7. *Temperaturhöjning i kommunala avfallsupplag som funktion av avfallets ålder. Sammanställning från 6 upplag belägna i stockholmstrakten. [37].*

4.5 Upplagsteknik

Under de senaste decennierna har man vid svenska upplag mer och mer anammat celldeponering, d v s att olika avfallsslag deponeras åtskilda från varandra. En annan tydlig trend är att andelen förbränningsrestprodukter ökar. En mera strukturerad deponering leder till ett ökat behov av tätskikt och möjligen även till att mera extrema miljöer kan uppkomma, då innehållet i enskilda deponiceller blir mera ensartat. Den ökande andelen förbränningsrestprodukter kan leda till mera saltrika lakvatten.

Det sätt på vilket en deponi byggs upp och drivs har avgörande betydelse för vilka processer som kan äga rum samt vilken intensitet de får. Indirekt påverkas även avfallet genom att olika miljöer, som skapas genom förhärskande upplagsprocesser, påverkar avfallet.

De påfrestningar som tätskikt utsätts för bestäms dels av de ovan beskrivna processerna, dels av valet av anläggningsmetoder och utformning.

4.5.1 Utformning av upplag

I Sverige är det sällsynt att upplag byggs högre än 20-30 m, i andra länder förekommer upplag som har 100 meters mäktighet och mer. En inbyggd densitet om ca 1,3 t/m^3 kan betraktas som en ungefärlig övre gräns för kompaktering av hushållsavfall och densiteten i täckskikt kan vara något högre, kring 1,7 t/m^3. Om ca 10 % av fyllnadshöjden utnyttjas för täckning kommer ett 20-30 m högt upplag utöva ett tryck på bottentätningar motsvarande en last på 30-40 t/m^3 eller ca 300-400 kPa (jämför kapitel 3).

De skjuvkrafter som slänter kan utsättas för är ofta låga, normala bottenlutningar överstiger sällan 3% medan slänter och invallningar i extremfall kan

nå upp emot 45 graders lutning och här kan skjuvspänningarna bli kritiskt höga.

Många svenska upplag är grundlagda nära ursprunglig markyta och upplagen bildar förhöjningar i landskapet. Till skillnad från upplag anlagda under mark, t ex i gamla grustag, är därför risken för luftinläckage och därmed sammanhängande påverkan av processer stor i många svenska upplag. Förutom uppvärmning och uttorkning kan luftinträngningen även leda till brand i upplag. För att minska riskerna med luftinläckage måste framförallt sidslänter täckas väl och lakvattendräneringar måste uföras med vattenlås.

4.5.2 Drift av upplag

Under drift av upplaget kommer luftinträngning att ske och en aerob nedbrytning av avfall kommer att äga rum. Omfattningen av den aeroba nedbrytningsfasen bestäms av:

- avfallets nedbrytbarhet
- kompakteringsgraden
- tippsårets storlek
- hastigheten varmed upplagets höjd ökar

Utöver faktorerna ovan kan nämnas tillgången på vatten. Den aeroba nedbrytningen har en självbegränsande tendens genom att den leder till uttorkning.

Vid låg kompaktering av nedbrytbart avfall, med rimligt hög vattenhalt, kan temperaturer upp kring 80° C utvecklas i upplag.

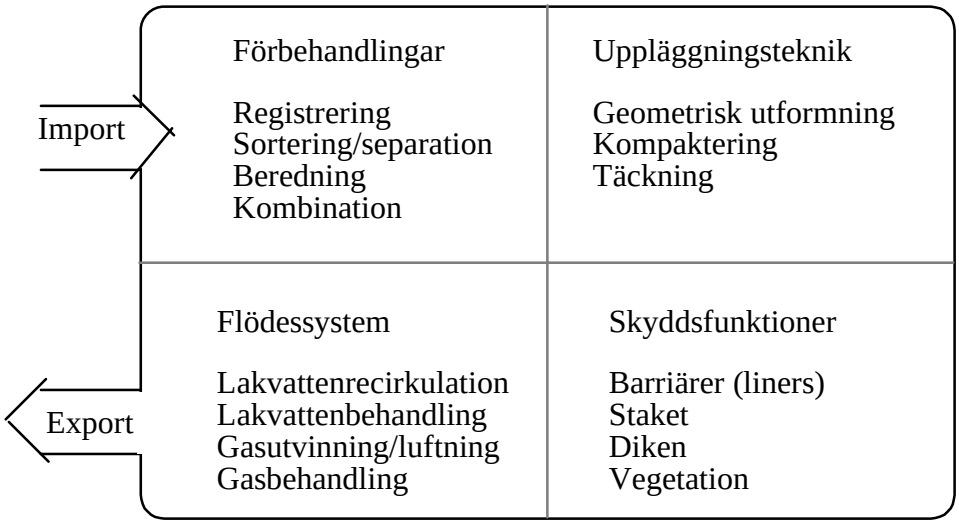
Vid sidan av åtgärder som påverkar luftinträngning är lakvattenrundpumpning en driftteknik som har potential att påverka tätskikt med bentonit. Dels verkar lakvattenrundpumpning som en förstärkare till de dominerande processerna i ett upplag, dels kan höga vattenhastigheter leda till erosion. Lakvattenrundpumpning ger en ökad vattenhalt i upplaget och därigenom en intensivare nedbrytning och utlakning. Detta leder i allmänhet till en intensifiering av den process som redan råkar dominera vid tillfället, men tenderar att minska gasrörligheten i avfallet och därigenom missgynna aerob nedbrytning. Lakvattenrundpumpning kan, om förutsättningar för det råder, även leda till en nedsättning av anaeroba processer genom nedkylning.

I Tabell 4.12 presenteras ungefärliga intervall på några egenskaper hos upplagsmiljön som är av betydelse för upplagsprocesser. Det är främst genom gasutbyte med atmosfären och lakvattenåterföring som upplagsutformning och drift kan påverka dessa egenskaper.

Tabell 4.12. *Inre upplagsmiljö. Ungefärlig variation för några faktorer som kan påverkas genom utformning och driftåtgärder.*

Parameter	**pH**	**Eh**	**Temperatur**	**Fuktkvot**
Enhet	**-log{H_3O^+}**	**mV**	**°C**	**% av TS**
Lägsta värde	4,5	-420	0	30
Högsta värde	9	810	70	> 120

Vid sidan av olika förbehandlingar som sortering, blandning, finfördelning, tvättning etc består de tillgängliga behandlingsteknikerna vid avfallsupplag framförallt i att utnyttja de naturligt förekommande nedbrytnings-processerna. Många av de i Figur 4.8 angivna åtgärderna kan påverka upplagsmiljön och därigenom avfallet och de processer som omvandlar det.



Figur 4.8 *Exempel på komponenter av upplagsteknik.*

4.6 Sammanfattning och slutsatser

Avfallssammansättning samt upplags utformning och drift påverkar de processer som sker i upplag och de miljöer som utvecklas på grund av dessa. Tätskikt kan därför komma att exponeras för vitt skilda miljöbetingelser (jämför Tabell 4.12) och därför bör tätskikt utformas olika och med hänsyn taget till detta.

Under vissa betingelser kan bl a:

- stora differentialsättningar uppkomma,
- höga temperaturer utvecklas, och
- lakvatten med höga salthalter uppstå.

I dessa fall bör det noga prövas om bentonitmattor erbjuder erforderlig säkerhet, i synnerhet i sådana fall där de används som enda tätskikt.

4.7 Referenser

1 Halmø T M, 1984
"Fast Avfall", Tapir, Trondheim.

2 Lundgren T och Leander P, 1986
"Deponering av avfall från kol och torveldning", SGI, rapport No 28, Linköping.

3 Lundgren T, Karlqvist L och Qvarfort U, 1982
Bentonittätning mot lakvatten" SGI rapport No 14, Linköping

4 Mesri G och Olson R E, 1971
"Mechanisms controlling the permeability of clays", Clay and Clay Minerals, Vol. 19, s 151-158.

5 Christensen T H, 1998
Affaldsteknologi, Teknisk Forlag A/S, København.

6 Robinson H D and Gronow J R, 1993
A review of landfill leachate composition in the UK. Proceedings from: *Sardinia '93: Fourth International Landfill Symposium, 11-15 October 1993,* S.Margherita di Pula, Cagliari, Italy, p. 821-832, CISA.

7 Harmsen J, 1983
Identification of organic compounds from a waste tip. *Water Research*. Vol. 17, p. 699-705.

8 Méndez R, Lema J M, Blázquez R, Pan M and Forjan C, 1989
Characterization, digestibility and anaerobic treatment of leachates form old and young landfills. *Water Science & Technology*. Vol. 21, p. 145-155.

9 Staubitz *et al,* 1988
Potential use of constructed wetlands to treat landfill leachate. Proceedings from: *First international conference on constructed wetlands for wastewater treatment,* Chattanooga, Tennessee, USA, p. 735-742, Lewis Publishers, Chelsea, USA.

10 Lagerkvist A, 1995
Tvåstegs anaerob nedbrytning: En alternativ behandlingsteknik för upplagt hushållsavfall, Doktorsavhandling, Tekniska Högskolan i Luleå., 1995:177 D.

11 Öman C and Hynning P-Å, 1993
Identification of organic compounds in municipal landfill leachates. *Environmental Pollution*. Vol. 80, p. 265-271. Chian, E. S. K. and F. B. DeWalle (1976). “Sanitary Landfill Leachates and their Treatment.” *Journal of the Environmental Engineering Division* **AA2**: 411-431.

12 Cuthill J H and Pepper T R, 1994
Land treatment of landfill leachate: a case summary of two facilities in Essex county, Ontario, Canada. Proceedings from: *Seventeenth International Madison Waste Conference, September 21-22, 1994,* Department of Engineering Professional Development, University of Wisconsin-Madison, p. 577-591.

13 Andreas L, 2000
Langzeitemissionsverhalten von Deponien für Siedlungsabfälle in den neuen Bundesländern, doktorsavhandling, TU Dresden.

14 Belevi H and Baccini P, 1989
Longterm behaviour of Municipal Solid Waste Landfills. *Waste Management and Research,* Vol. 7, pp. 43-56.

15 Kruse, K, 1994
Langfristiges Emissionsgeschehen von Siedlungsabfalldeponien. Heft 54 Veröffentlichungen des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft TU Braunschweig.

16 Kylefors K, Ecke H and Lagerkvist A, 1999
Relevancy of a discharge limit of COD regarding landfill leachates, *Sardinia 99 - The 7th International Waste Management & Landfill Symposium*, October 4-8, Cagliari, Italy.

17 Krümpelbeck I and Ehrig H-J, 1999
Abschätzung der Restemissionen von Deponien in der Betriebs- und Nachsorgephase auf der Basis realer Überwachungsdaten. BMBF-FKZ 1471067, Sep. 1999.

18 Riehl-Herwisch G and Lechner P, 1995
Hausmüllversuchsanlage Breitenau – Untersuchungen zum quantitativen und qualitativen Wasserhaushalt (1986-1991). Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Wasserwirtschaftskataster. Wien, Mars 1995.

19 Heyer K-U and Stegmann R, 1997
Untersuchungen zum langfristigen Gefährdungspotential und Deponieverhalten von Ablagerungen. *BMBF-Statusseminar „Verbundvorhaben Deponiekörper“* 04./05.02.1997, Vol 2, Wuppertal, Umweltbundesamt Berlin.

20 Kruse K et al, 1994
Sickerwasserqualität von Siedlungsabfalldeponien. *Korrespondenz Abwasser,* (41) 5, 780-786

21 Kylefors K and Lagerkvist A, 1997
Changes of leachate quality with degradation phases and time. *Sardinia 97,* Vol. II, 133-38, CISA, Cagliari, Italy.

22 Lagerkvist A, 1987
Om nedbrytnings- och transportprocesser i avfallsupplag, Teknologie licentiatuppsats 1986:004 L, Luleå Tekniska Högskola.

23 Bergman A, 1996
Characterisation of industrial wastes. Licentiate Thesis, The Landfill Group, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden.

24 Hjelmar O, 1996
Disposal strategies for municipal solid waste incineration residues. *Journal of Hazardous Materials*. Vol.47 p.345-368.

25 Lagerkvist A editor, 1997
Samordnad deponigas. Forskning, utveckling, demonstration - Slutrapport. RVF rapport 97:7, p.154, RVF, Malmö. Lundgren, T., Karlqvist, L. och Qvarfort U, 1982, Bentonittätning mot lakvatten" SGI rapport No 14, Linköping

26 Farquhar G J and Rovers F A, 1973
Gas Production During Refuse Decomposition. *Water , Air and Soil Pollution* (2): 483-495.

27 Chian E S K and DeWalle F B 1976
Sanitary landfill leachates and their treatment. ASCE Journal of the environmental engineering division (April): 411 - 429.

28 Rees J F, 1980
The Fate of Organic Carbon Compounds in the Landfill Disposal of Organic Matter. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* (30):

29 Ehrig H-J, 1980
Beitrag zum quantitativen und qualitativen Wasserhaushalt von Mülldeponien. 2nd ed. Heft 26, Inst. f. Stadtbauwesen, TU Braunschweig

30 Gottschalk G, 1986
Bacterial Metabolism. New York, Springer Verlag. Mennerich, A. (1984). “Gemeinsame Ablagerung von Hausmüll und Gewerbeabfällen.” *Müll und Abfall* **16**(8): 225-231.

31 Mennerich, A 1984
Gemeinsame Ablagerung von Hausmüll und Gewerbeabfällen. *Müll und Abfall* (8): 225-231.

32 Ehrig H-J 1980
Beitrag zum quantitativen und qualitativen Wasserhaushalt von Mülldeponien. 2nd ed. Heft 26, Inst. f. Stadtbauwesen, TU Braunschweig

33 Robinson H D and Gronow J R 1993
A review of landfill leachate composition in the UK. Proceedings from: *Sardinia '93: Fourth International Landfill Symposium, 11-15 October 1993,* S.Margherita di Pula, Cagliari, Italy, p. 821-832, CISA.

34 Ehrig H-J, 1989
Water and element balances of landfills. The Landfill - Reactor and Final Storage. P. Baccini. Berlin, Springer-Verlag. 20: 83-115.

35 Robinson H D and Gronow J R 1993
A review of landfill leachate composition in the UK. Proceedings from: *Sardinia '93: Fourth International Landfill Symposium, 11-15 October 1993,* S.Margherita di Pula, Cagliari, Italy, p. 821-832, CISA.

36 Lagerkvist A, 1994
Experiences of two step anaerobic degradation of MSW in laboratory and field experiments. *Seventeenth International Madison Waste Conference*, 21-22/9, pp.241-259, Madison, Wisconsin.

37 Meijer J-E, 1993
Lakvatten från avfallsupplag, sammanställning av fältstudier, Licentiatuppsats , Institutionen för mark och vattenresurser, Kungliga tekniska Högskolan, Stockholm.

5 UTFORMNING OCH ANVÄNDNING AV SYNTETISKA LERGEOMEMBRAN

5.1 Tilltänkt funktion i en deponi

Ett antal allmänt accepterade krav kan ställas upp beträffande vilken funktion lergeomembran behöver ha för att en deponi skall fungera på tilltänkt sätt, bland annat:

- Efter inplacering samt påläggande av tätskikt skall lergeomembranet utveckla en tätande gel så snart det kontaktas med vatten
- Det skall erbjuda ett tillräckligt motstånd mot genomströmning av vatten
- Det skall erbjuda en tillräcklig skjuvhållfasthet, med hänsyn taget till topografiska förhållanden samt förekommande sättningar
- Det skall ha en sådan ytstruktur under sin funktion i deponin att friktionen blir tillräckligt hög gentemot omgivande material
- Det skall bibehålla sin funktion även vid varierande tillgång till vatten
- Det skall bibehålla sin funktion även vid (förekommande) upprepad frysning /upptining
- Det skall bibehålla sin funktion även när lergeomembranet kontaktas med ämnen som finns eller kan tänkas bildas i en deponi - även under långvarig exponering
- Det skall bibehålla sin tätande funktion även efter penetration av små föremål
- Det skall bibehålla sin tätande funktion även i samband med de temperaturförhållanden som kan tänkas råda i en deponi

Härutöver bör följande krav ställas:

- Bibehållen funktion under decennier och århundraden
- Förutsägbar utveckling beträffande förändringarna av funktionen på längre sikt

Av särskilt intresse är följande frågor:

- Påverkan från ämnen som finns i eller kan tänkas bildas i en deponi
- Funktion beträffande gasgenomgång
- Effekter under lång tid

Härutöver ställs även krav beträffande mattornas funktion under transport och hantering samt i samband med läggning. Exempelvis måste mattorna kunna skarvas samt tåla påläggning av täckning över dem i samband med utläggning.

5.2 Konstruktionsförutsättningar

Följande konstruktionsförutsättningar för syntetiska lergeomembran kan härledas ur funktionskraven ovan (Avsnitt 5.1) och ur den kunskapsbas som redovisats i Avsnitten 3 och 4.

- Vid pålagd täckning samt med det tryck som detta ger skall mattan ta upp vatten och bilda en gel som är tillräckligt tät.
- De omgivande geotextilierna samt fogningen mellan dem skall tåla det tryck som utvecklas till följd av svällningen.
- Bentoniten behöver vara innesluten i material med en maskstorlek som inte påtagligt överskrider agglomeratstorleken i den gel som bildas. Gelen får inte tränga ut genom maskorna så att material förloras eller glidplan induceras.
- Omslutande material behöver vara förankrade i varandra så att en tillräckligt hög skjuvhållfasthet erhålls. Vid aktuella densiteter är bentonitens egen skjuvhållfasthet obetydlig och medger endast ett fåtal graders släntlutning.
- Lergeomembranen, liksom fogarna mellan dem skall ha tillräckligt hög hållfasthet för att klara de påkänningar som kan uppkomma i samband med sättningar i en deponi.
- Penetrerande föremål skall inte ge upphov till läckage annat än under kort tid. De hål som bildats skall självläka.
- Mattorna skall vara kemiskt kompatibla med de ämnen som finns i eller utvecklas i en deponi.
- Polymera material som används i geotextilierna skall vara beständiga gentemot oxidation och bära påliggande last under lång tid.

Om krav ställs på att bentonitmattans egenskaper skall utvecklas enligt visst mönster under mycket lång tid (till exempel avta successivt), blir detta också en konstruktionsförutsättning.

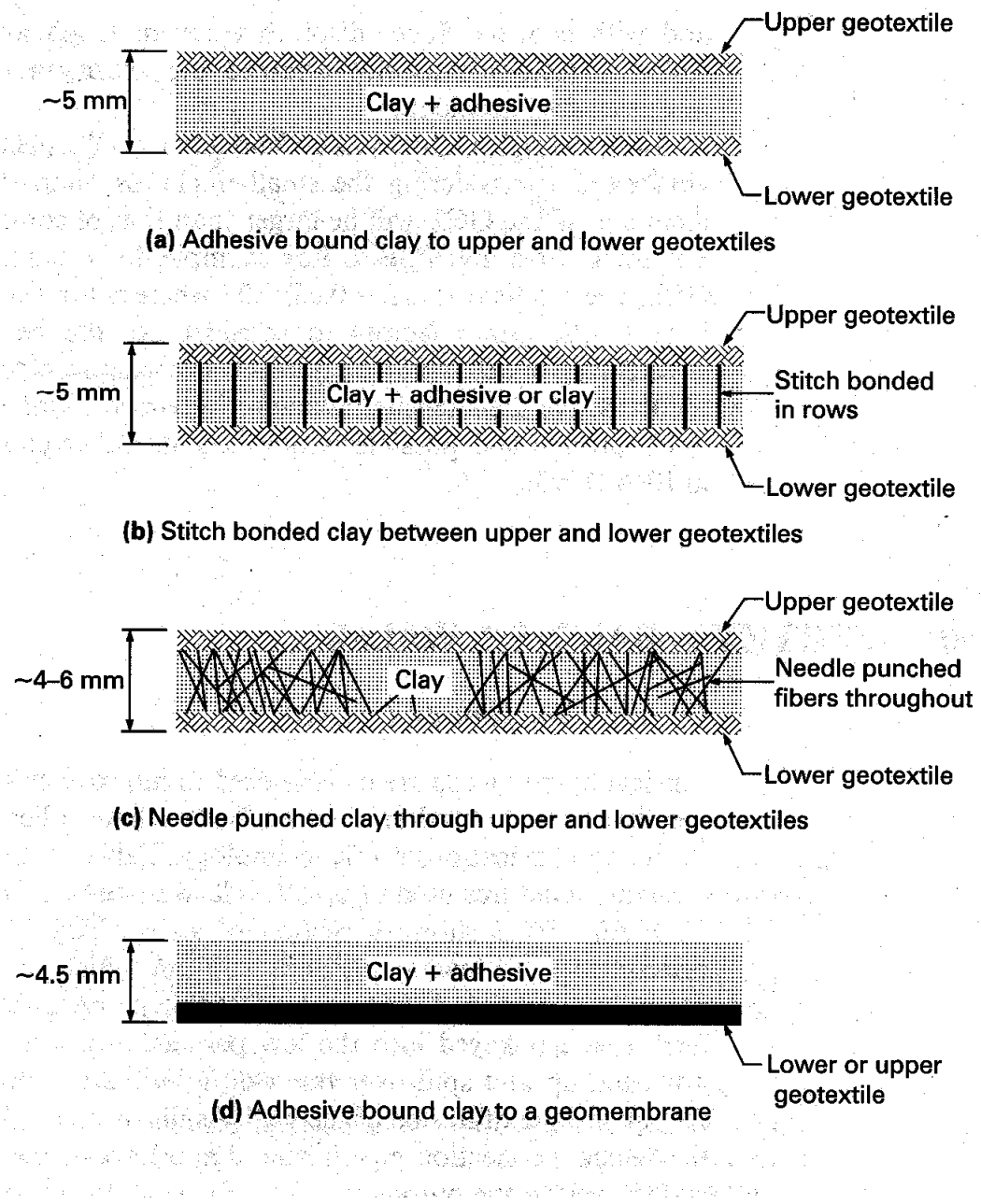
5.3 Tillgängliga produkter

De allra flesta produkter som finns på marknaden har en sandwichkonstruktion med bentonit i mitten och geotextilier under och över. Fem typer förekommer, se Figur 5.1.

Det förekommer dock ytterligare en variant med geomembran på vilket man fäst bentonit med hjälp av ett bindemedel. Syftet med användningen av bindemedel är att kunna hantera geomembranet tillsammans med bentoniten till dess att mattan kommit på plats. Sådana mattor får en låg skjuvhållfasthet och kan endast användas vid mycket låga lutningar.

Mattor tillverkade av bentonit och geotextilier kan ges en hög skjuvhållfasthet genom att geotextilierna fogats samman med nålfiltning (needle-punch) och maskinsöm (stitch-bonding; enligt tekniskt svensk-engelskt lexikon be-

tyder "stitch-bonded fabric" "mask-bondad duk"). Tillverkningsprocesserna beskrivs kortfattat i Avsnitt 5.4.



Figur 5.1. *Några olika typer av syntetiska lergeomembran. Från CETCO.*

Exempel på bentonitmattor som marknadsförs i Sverige framgår av Tabell 5.1.

Tabell 5.1. *Exempel på syntetiska lergeomembran som marknadsförs i Sverige.*

Tillverkare	**Produktnamn / kvalitet**	**Bentonit**	**Textil**	**Bindning**
CETCO Europe Limited	Bentomat SS	Naturlig natriumbentonit	Vävd geotextil och icke vävd geotextil.	Nålfiltning
CETCO Europe Limited	Bentomat DN	Naturlig natriumbentonit	Vävd geotextil på båda sidor.	Sömmar
CETCO Europe Limited	Claymax 600SP	Naturlig natriumbentonit	Två lager geotextil, samt geomembran.	Nålfiltning mellan geotextilierna; geomembranet laminerat
Huesker Synthetic GmbH & Co	NaBento RL-N	Naturlig eller aktiverad natriumbentonit	Polyolefintextil på båda sidor	Sömmar
Naue Fasertechnik GmbH & Co	Bentofix BFG 5000	Naturlig natriumbentonit	Vävd geotextil och icke vävd geotextil, båda av polypropylen	Nålfiltning
Naue Fasertechnik GmbH & Co	Bentofix NSP 4900-1	Naturlig natriumbentonit	Vävd geotextil och icke vävd geotextil, båda av polypropylen	Nålfiltning

Namn, adress med mera för tillverkare och återförsäljare redovisas i Tabell 5.2.

Tabell 5.2. *Namn och adress på tillverkare och återförsäljare av några exempel på fabrikat.*

Tillverkare	**Återförsäljare / agent**
CETCO Europe Limited, Birch House, Scotts Quays, Birkenhead, Merseyside L41 1FB Storbritannien. Tel +44-151-606 5900.	Morfeldt Geotechnology AB, Banergatan 37, 115 22 Stockholm. Tel 08-663 46 56
Huesker Synthetic GmbH & Co, Fabriksstrasse 13-15, D-48712 Gescher, Tyskland. Tel:+49-25 42 7 01-0 E-post huesker.synthetic@t-online.de	AB Periskopet, Körsbärsvägen 10, 114 23 Stockholm. Tel 08-673 5522
Naue Fasertechnik GmbH & Co. KG, Wartturmsstrasse 1, D-32312 Lübbecke, Tyskland. Tel +49-5741-4008-0.	ViaCon AB, Box 2064, 531 02 Lidköping. Tel 0510-60040. www.viacon.se. E-post wolf@viacon.se

Vissa tekniska data för några vanligen förekommande kvaliteter redovisas i Avsnitt 5.6 (Tabellerna 5.3 – 5.7).

5.4 Tillverkning

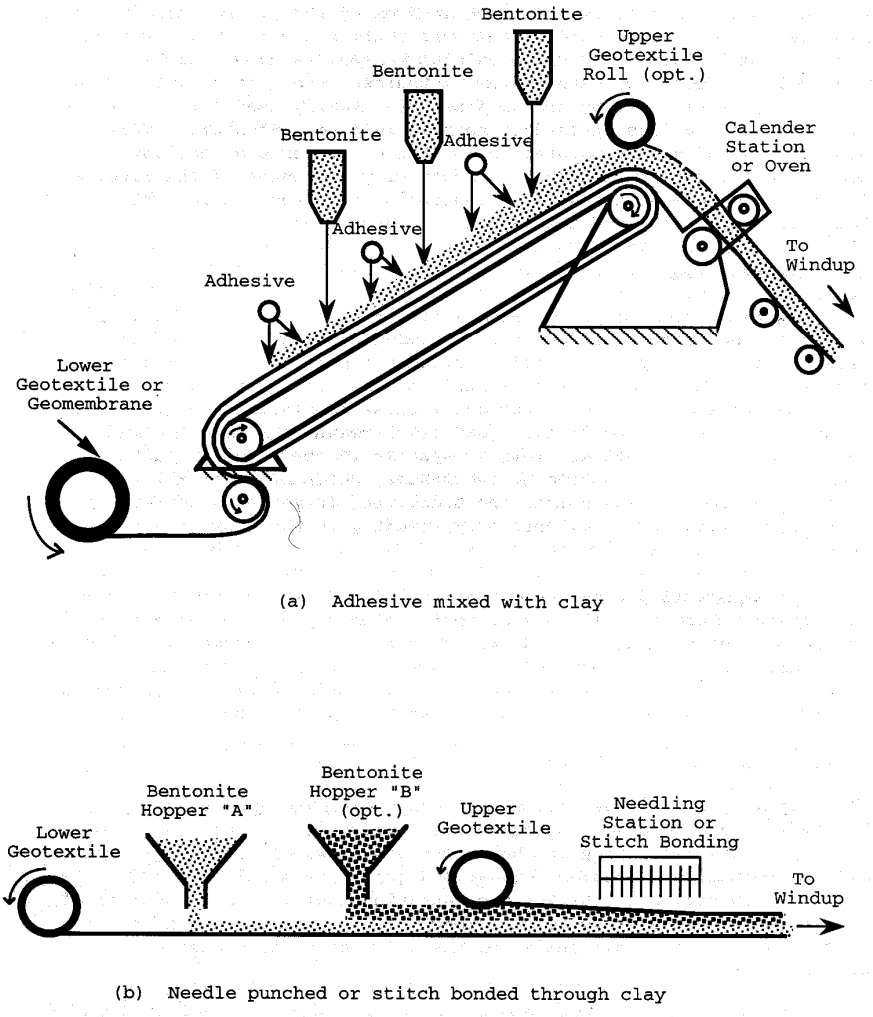
Syntetiska lergeomembran tillverkas i bredder mellan 4,0 och 5,2 meter och i längder på 30 till 60 meter. I samband med tillverkningen rullas mattorna upp på en cylindrisk kärna och förses med plastöverdrag för att skydda mot fukt. I osvällt skick är mattorna ca en centimeter tjocka.

Tre olika metoder tillämpas för att binda samman bentonit och polymermatta: limning, sömnad, och nålfiltning. Metoder för tillverkning illustreras i Figur 5.2 och de olika typerna av mattor visas i Figur 5.1.

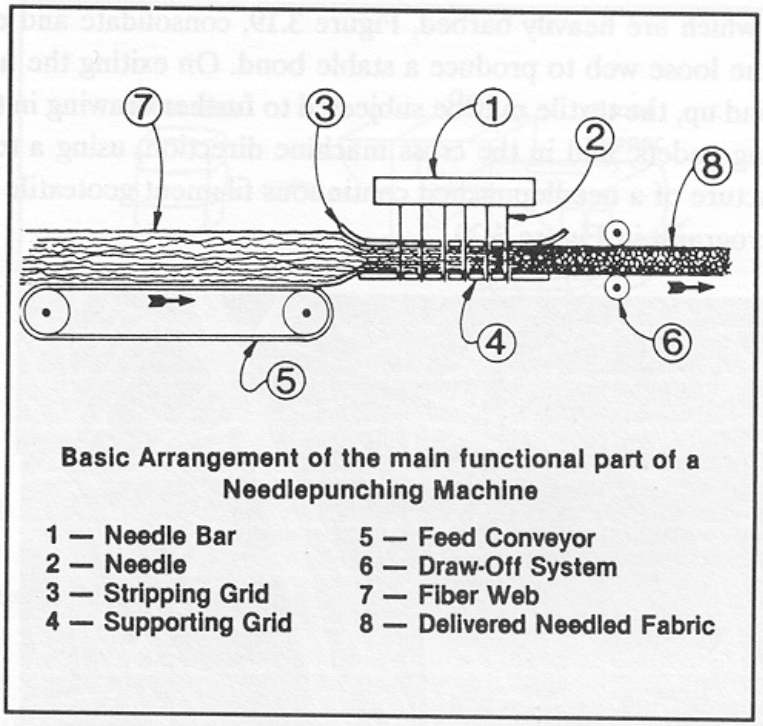
I fallet nålfiltad matta placeras bentonitgranuler på en vävd textil och en icke vävd matta (non-woven) läggs över. Nålfiltningen åstadkoms genom att en skiva med ett mycket stort antal nålar med ett slags hullingar trycks genom mattan, varvid den tar med sig trådan från den övre mattan som inte är vävd och för ner genom bentoniten och den underliggande vävda mattan. Hur dessa ”hullingar” är utformade framgår av Figur 5.3. Det är ett stort antal bryggor som på detta sätt kan åstadkommas, enligt uppgift[3] två till tre miljoner per kvadratmeter. Frånvaro av brutna kvarvarande nålar säkerställs med hjälp av elektrisk detektering av magnetiska material.

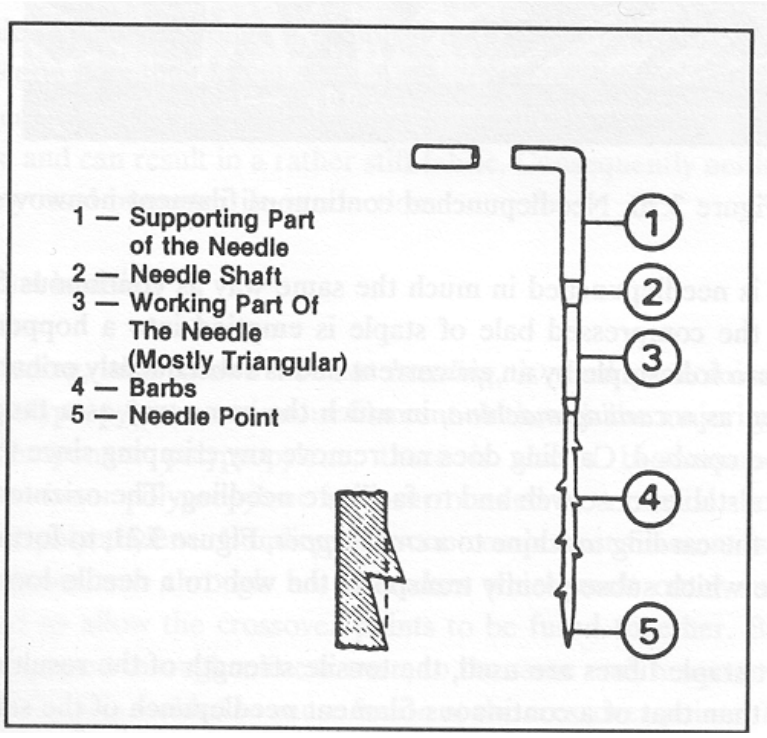
En sydd matta tillverkas analogt men med den skillnaden att de övre och undre skikten fogas samman genom sömnad. Sömmarna har ett inbördes avstånd av ett par centimeter.

Enligt ett tredje alternativ binds bentonitgranuler och geotextil samman med hjälp av ett bindemedel vars sammansättning uppges vara en affärshemlighet.



Figur 5.2. *Tillverkning av bentonitmattor. a) bentonitpulver som limmas mot ett underlag av geomembran och b) nålfiltning. Från [1]*





Figur 5.3. *Nål som används vid nålfiltning. Från [2]*

5.5 Applicering

5.5.1 Utläggning av bentonitmattor

Flera tillverkare ger detaljerade anvisningar för applicering av mattan. Det är angeläget att dessa följs av flera skäl. Dela är det viktigt att undvika otäthet även på enstaka punkter eftersom detta kan leda till koncentrering av flöden till defekterna. Vidare är det svårare att upprätthålla god kvalitetssäkring i fält jämfört med i fabrik.

Det är av väsentlig betydelse för resultatet att mattan är torr tills dess att den är täckt med ett skikt som uppgår till minst 0,3 meter[4-5], gärna minst en meter[6]. I en matta som är befuktad kan nämligen bentonitgelen förskjutas i mattan i samband med punktlaster vilket kan ge upphov till stora variationer i bentonitskiktets tjocklek[4,7]. Sådana punktlaster skulle kunna uppstå om en person gick på en uppsvälld matta eller i samband med påläggning av täckskiktet.

Den huvudsakliga hanteringsgången i samband med en installation är som följer. För detaljerade anvisningar hänvisas till de olika tillverkarna[1] (se Tabell 5.2.[4,8-9]

1 Underlaget bereds så att den välpackade (konsoliderade) ytan blir plan (< några centimeters avvikelse från avsedd plan yta per längdmeter). Konsolidering kan eventuellt vara svår att åstadkomma när hushållsavfall ingår i underlaget eftersom detta sviktar (deformeras elastiskt) och tar upp påkänningarna från markvibratorer.

2 Uppstickande föremål skall vara < cirka 1 centimeter.

3 Mattorna ankommer på lastbil i form av rullar.

4 Vid uppläggning skall de skyddas mot regn.

5 Rullarna hanteras med hjälp av ett stålrör som går genom rullen. Lyft- och hanteringsutrustningen greppar mot detta rörs ändar. Lyft och hantering sker så att rullarnas ändar inte påverkas.

6 Hanteringen sker vid tjänlig väderlek (d v s ej regn samt frost endast under vissa betingelser). Vid vattenupptag över en viss nivå i mattan kasseras den eller överläggs med en torr.

7 Rullarna läggs ut nerifrån och upp.

8 Våderna läggs med ett par decimeters överlapp, samt i vissa fall tätande bentonitpulver eller motsvarande. Liknande, men större, överlapp utförs i samband med skarv i längdriktningen.

9 Förankring i överändan i form av ett "dike"

10 Genomföringar utförs med extra skarvmatta samt bentonitpasta eller bentonitpulver.

[1] Den ovan angivna hanteringsgången följer en beskrivning som utfärdats av CETCO. Motsvarande beskrivningar finns även för andra seriösa tillverkare.

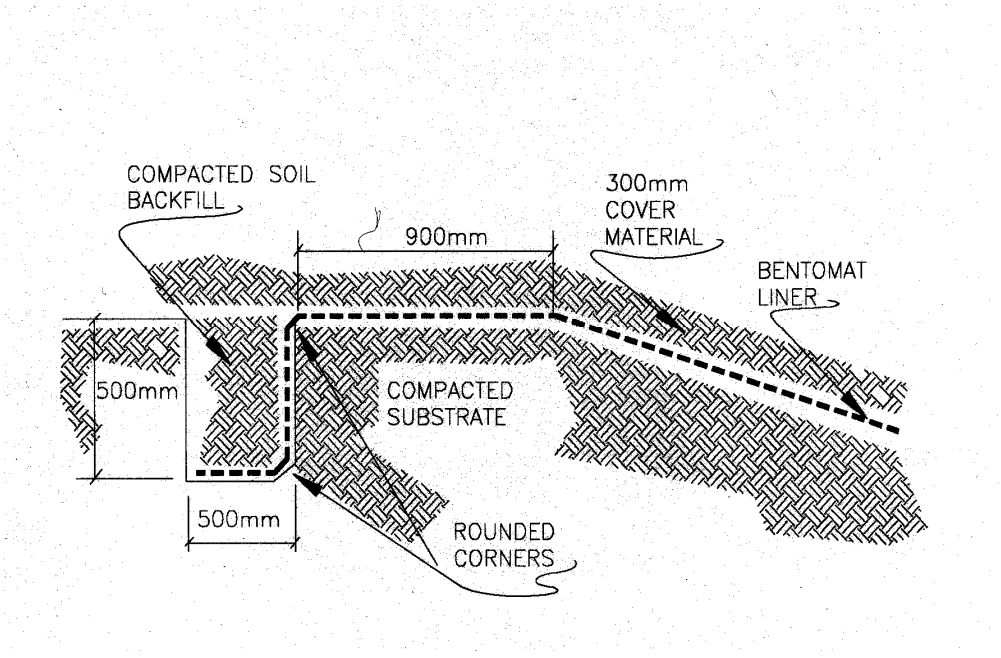
11 Bentonitmattan får endast beträdas med försiktighet så att den inte penetreras. Vanliga fordon eller maskiner får ej föras in på bentonitmattan.

12 Täckning med hjälp av bandfordon, till exempel grävskopa, utförs så att mattan inte utsätts för punktlaster eller skjuvningar.

5.5.2 Skarvar, genomföringar och förankringar av bentonitmattor

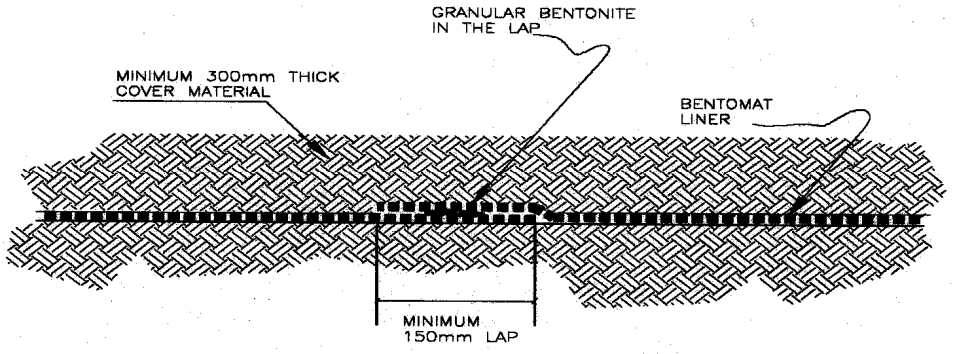
Skarvar, genomföringar och förankringar kan bli svaga punkter i helheten såvida de inte utförs på ett korrekt sätt. Även här finns detaljerade anvisningar från de seriösa tillverkarna, och det påpekas i litteraturen att det har en avgörande betydelse för deponins funktion att alla sådana tätningar utförs riktigt.

Bentonitvåderna behöver förankras i överänden. Detta sker genom att man gräver ett litet dike i vådernas överändar och vinkelrätt mot deras största längd. Överändarna viks ner i diket som sedan fylls med material med lämpliga friktionsegenskaper. Resultatet framgår av Figur 5.4.



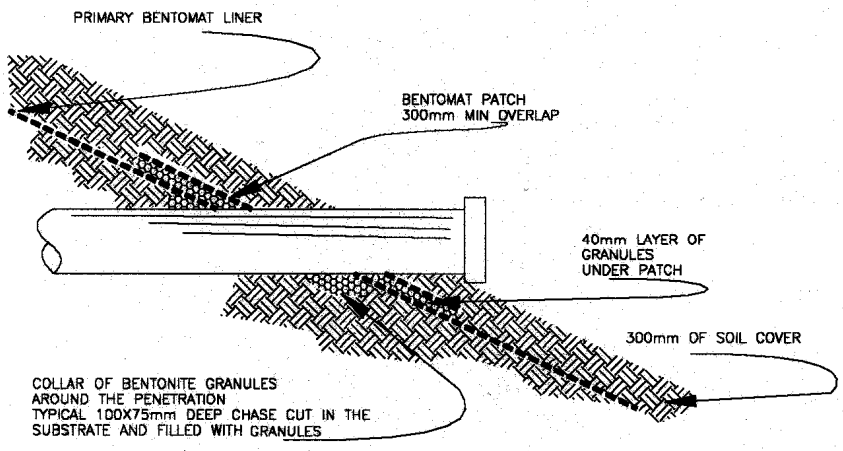
Figur 5.4. *Exempel på arrangemang för förankring av vådernas överändar. Från CETCO.*

Ett exempel på ett rekommenderat förfarande för arrangemang av längsgående skarvar mellan våderna visas i Figur 5.5. Vanligen fordras inläggning av extra bentonit mellan mattorna i skarven.

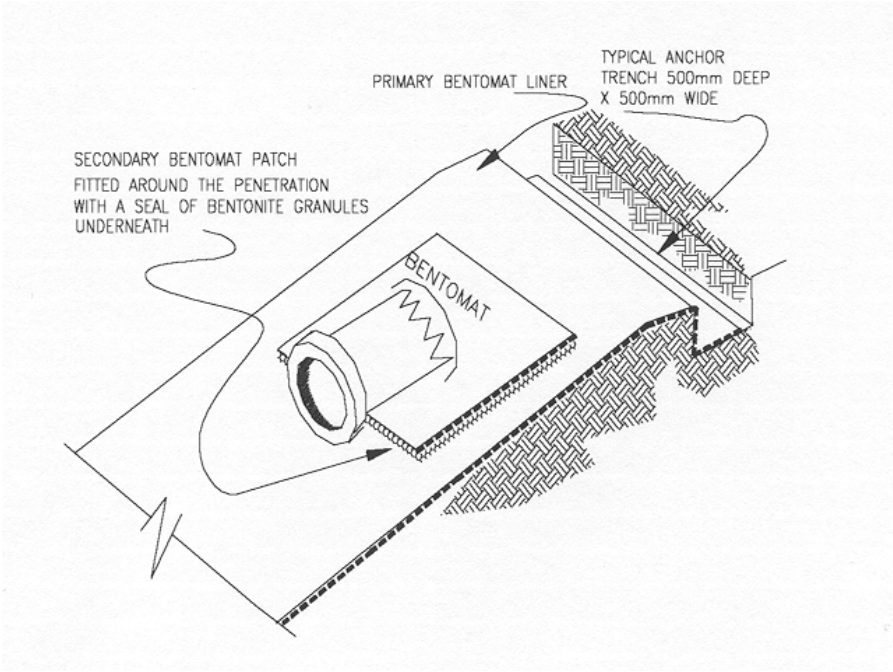


Figur 5.5. *Ett exempel på arrangemang för längsgående skarvning av våder. Från CETCO.*

Vanligen krävs ett antal genomföringar. Ett exempel på en rekommenderad utformningar av en horisontell genomföring redovisas i Figurerna 5.6a och 5.6b.

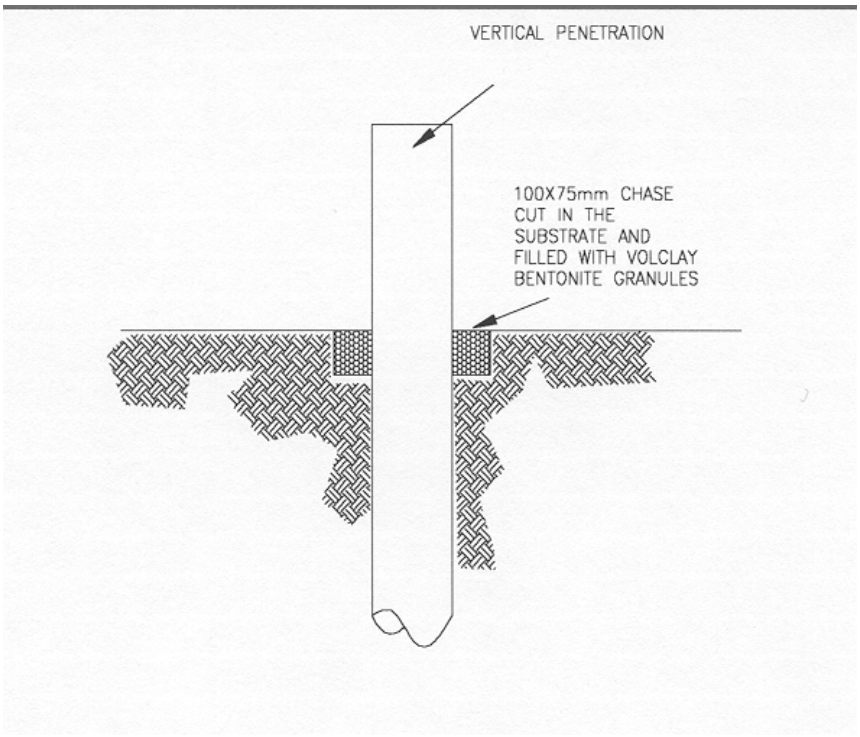


Figur 5.6a. *Exempel på utformning av horisontell rörgenomföring, tvärsnitt. Från CETCO.*

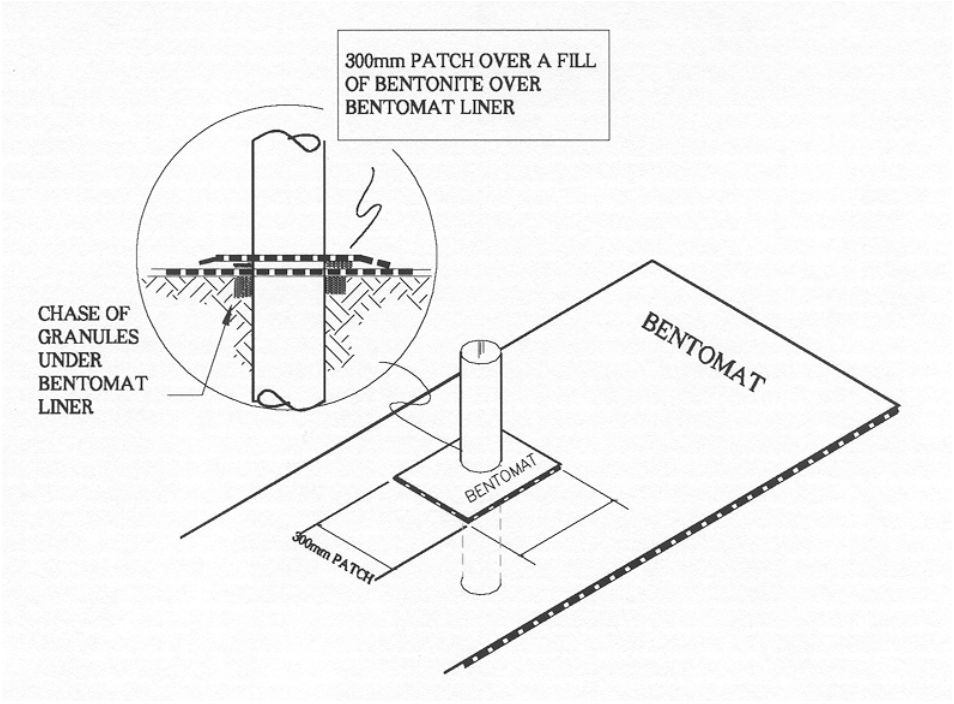


Figur 5.6b. *Exempel på utformning av horisontell rörgenomföring,vy snett ovanifrån. Från CETCO.*

Ett exempel på utformning av en vertikal genomföring visas i Figurerna 5.7a och 5.7b.

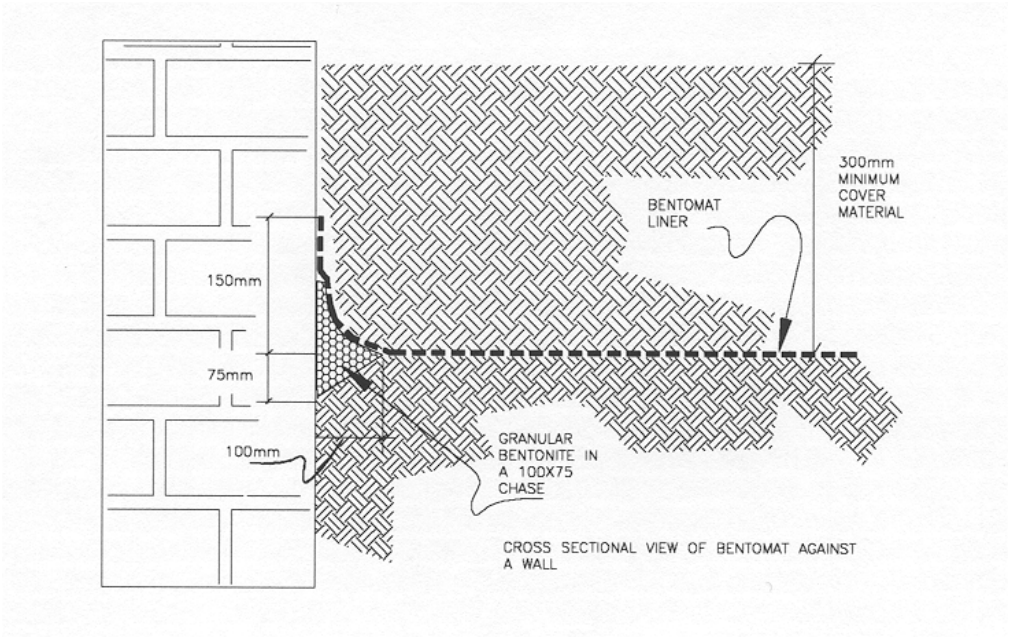


Figur 5.7a. *Ett exempel på en vertikal rörgenomföring, tvärsnitt. Från CETCO.*



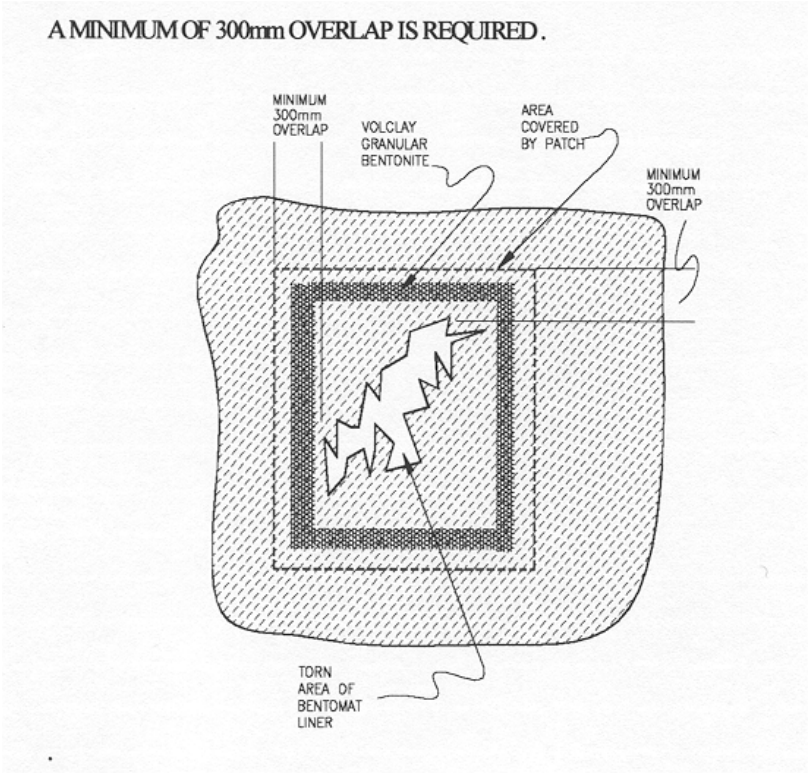
Figur 5.7b. *Ett exempel på en vertikal rörgenomföring, vy snett från ovan. Från CETCO.*

Ett exempel på en anslutning till en vägg visas i Figur 5.8.



Figur 5.8. *Ett exempel på en anslutning av en bentonitmatta till en vägg. Från CETCO.*

För den händelse att en skada uppkommer på en bentonitmatta behöver den kunna lagas. Ett exempel på en sådan lagning visas i Figur 5.9.



Figur 5.9. *Ett exempel på en lagning av en bentonitmatta med hjälp av en på¨lagd extra bit. Från CETCO.*

I vissa fall kan det vara lämpligt att befukta bentonitmattan omedelbart efter det att täckskiktet pålagts. Bevätning kan då ske med hjälp av ett sprinklersystem.

5.5.3 Planering, dokumentation och projektledning

Som närmare beskrivs i Avsnitt 5.6 kvalitetssäkras själva bentonitmattan med hjälp av väl utvecklade program för kvalitetssäkring. Tillverkningen sker genom serieproduktion i fabrik med goda möjligheter till kontinuitet i kvalitetskontroll och kvalitetssäkring.

Förutsättningarna för för att få ett resultat som uppfyller uppställda mål är delvis väsentligt annorlunda för ett anläggningsprojekt i en deponi.

För det första är en sådan ny- till- eller ombyggnad vanligen ett unikt projekt, och stor hänsyn behöver vanligen tas till anläggningsspecifika förhållanden och förutsättningar.

För det andra utförs arbetet med bentonitmattan ofta på entreprenad med personer med mer allmän kompetens i anläggningsbranschen än specialistkunnande som krävs för en fullgod installation. Det ligger vidare i sakens natur att det ofta kan vara svårt att genom mätningar efteråt komma underfund med om utförandet varit korrekt.

Mot denna bakgrund är det av väsentlig betydelse för resultatet att de tekniska kraven samt typen av utformning av deponin klarställs tidigt i planeringen. I detta skede bör de funktionskrav som ställts upp i Avsnitt 5.1 gås igenom och deras innebörd i det specifika fallet analyseras.

Analyserna i inledningsskedet bör leda till att en plan upprättas för hur den nya (alternativt om- eller tillbyggda) anläggningen skall utformas. I planen bör också finnas en kravspecifikation beträffande de material som skall användas, inklusive de syntetiska lergeomembranen.

Enligt [10] bör följande typer av kriterier kvantifieras:

- genomsläpplighetsegenskaper
- effekten av sättningar
- effekt av uttorkning / bevätning
- effekt av frysning / upptining
- betydelsen av pålagd last (täckskikt)
- betydelsen av den hydrauliska gradienten
- betydelsen av ämnen som kan förekomma i lakvattnet
- val av jordmaterial över och under tätskikten
- effekten av rötter
- skjuvhållfasthet hos bentonitmattan (kort och lång tid)
- skjuvhållfasthet hos gränsskiktet mellan bentonitmatta och övriga material
- permeabilitet hos överlappet
- möjlighetern till självläkning efter en penetration

Beträffande testmetoder, se Avsnitt 5.6.

I planeringen inför ett markanläggningsprojekt som innefattar utläggning av bentonitmattor bör ingå upprättandet av en utläggningsplan. En sådan plan bör ge svar på bland annat följande frågeställningar[10].

- dränering
- topografi
- vådernas lägen
- förankring
- genomföringar
- beredskap för olika väderförhållanden och diverse händelser

Våderna bör läggas i sluttningsriktningen och rullas uppifrån och ner. De skall förankras genom att överändarna grävs ner i diken. Överlappen i längd och sida får inte ligga om lott så att fyra mattor kommer att ligga över varandra. Överlappen i vådernas kortsidor skall vara väsentligt större än de i

långsidorna. Vid större lutningar bör även nedre våden i en sådan skarv förankras. Skarvar i vådernas kortsidor bör ej göras nära topp eller botten.

I planen bör ingå även specifika detaljer såsom förankring till eventuella väggar, genomföringar, läggningsriktningar (dvs neråt samt att ovanförliggande membran överlappar det eller dem som ligger nedanför).

Läggningsplanen bör vidare vara så utformad[10] att den kan utgöra en grund för kvalitetskontroll och kvalitetssäkring. Följande data bör redovisas:

- underytans beskaffenhet
- datum för installationen
- plats (karta)
- nummer på de bentonitmattrullar som använts och var de anbringats
- provtagningsplan samt läge och identifikation för de prover som tagits
- väderförhållanden samt eventuella åtgärder för att skydda mattorna gentemot bevätning i förtid
- Mängder och fördelning av extra bentonitmaterial för skarvar och genomföringar

Dokumentation av detta har naturligtvis sin största betydelse för att installationen skall bli korrekt utformad. Den kan emellertid också visa sig vara av stort värde i samband med garantifrågor. Det kan exempelvis vara svårt för en deponiägare att hävda att läckage beror på brister hos de införskaffade mattorna om det samtidigt visar sig att mängden införskaffad lösbentonit kraftigt understiger vad som rekommenderas för installationen i fråga.

Det är viktigt att entreprenören får det expertstöd som behövs samt att inspektion utförs i anslutning till avslutandet av de olika moment vars resultat skall inspekteras.

För större nyanläggningar rekommenderas att en testyta utförs[10]. Denna skall ha så likartade egenskaper som den verkliga ytan som möjligt.

5.6 Provning och kvalitetskontroll

5.6.1 Allmänt

Kvaliteten hos en installation av ett syntetiskt lergeomembran beror på installationen som helhet, d v s över och underliggande jordmassor, övriga syntetiska geotextilier och andra material samt bentonitmattan. I det följande berörs emellertid endast den senare.

Kvaliteten hos ett syntetiskt lergeomembran beror på samtliga de åtgärder som vidtagits i form av val av råvaror, processutformning, processkontroll samt mätning och provning. Utformningen av tillgängliga produkter beskrivs i Avsnitt 5.3, tillverkning i Avsnitt 5.4 och applicering i Avsnitt 5.5. Provning och kvalitetskontroll avseende kedjan råvara - drifttagen matta redovisas i Avsnitten 5.6.2 - 5.6.5 nedan. Framställningen bygger på [3,6-7,10-20] samt på direkta kontakter med några av de större leverantörerna.

För närvarande pågår en intensiv utveckling när det gäller provningsmetoder. Detta hänger främst samman med att tekniken är relativt ny och att det föreligger ett stort behov av att få fram hur provtagning och provning skall utnyttjas för kvalitetssäkring. En annan orsak till den höga förändringstakten är att det nyligen[17] kommit direktiv från EU (European directive 89/106/EEC) som skall implementeras i form av harmonisering av nationella standarder (alternativt nationellt standardiseringsarbete). Det har också utformats ett system för "attestation of conformity" (som kanske kan översättas med intygande om anpassning) som också skall genomföras på så sätt att producenterna dokumenterar sin typprovning och kvalitetssäkring samt får sin produktion certifierad av ett godkänt organ för detta.

Det är inte någon djärv gissning att vissa delar av implementeringsarbetet vad gäller standarder kan komma att ta några år.

Ovan beskrivna utveckling av testmetoder och standarder sker parallellt med en mera allmän och omfattande internationell forsknings- och utvecklingsverksamhet kring syntetiska geomembran och syntetiska lergeomembran. Inte minst finns det hos tillverkarna av syntetiska lergeomembran ett stort intresse för produktutveckling och och produkternas funktion samt väl utvecklade system för kvalitetssäkring. Den med denna sammanhängande provningen avser såväl ingående råvaror (polymerer av olika slag i geotextilier samt bentonit) som de färdiga produkterna.

5.6.2 Bentonit

Lerråvaran till lergeomembranen, bentonit, är en naturprodukt vars egenskaper varierar kraftigt med ursprunget. Egenskaperna varierar även mellan olika delar av en given fyndighet. I det kanske mest kända området för utvinning av natriumbentonit, Wyoming, är det bara en cirka en meter tjock bädd av bentonit som har en sådan kvalitet att den utan kemisk modifiering är lämplig för bentonitmattor. Detta ställer höga krav på prospektering och

noggrannhet i utvinningen så att råmaterial med olika egenskaper hanteras separat. Vidare är det mycket viktigt att egenskaperna hålls jämna för en viss kvalitet. Detta åstadkoms till en stor del genom att materialet blandas i de olika stegen: vid upplag på själva utvinningsplatsen, vid upplag vid behandlingsanläggningen, i samband med så kallad "farming", samt i samband med omlastningar under transport (t ex vid omlastning från järnväg till båt). Farming innebär att ett toppskikt i ett upplag torkas samt genomgår viss vittring samt att toppskiktet med jämna mellanrum skjuts över upplagets högkant.

I behandlingsanläggningen sker torkning (t ex i roterugn) samt efterföljande siktning, varvid önskad kornstorleksfördelning erhålls.

Egenskaper av intresse samt vanliga metoder för karakterisering av bentonitråvara redovisas i Tabell 5.3. Tester och metoder kan veriera mellan tillverkare och laboratorier.

Exempel på egenskaper för bentonit i några vanligen förekommande bentonitmattekvaliteter redovisas i Tabell 5.4.

Tabell 5.3. *Egenskaper av intresse samt vanliga metoder för karakterisering av bentonit avsedd för bentonitmatta.*

Metod	**Standard**
Permeabilitetskoefficient. Räknas fram ur uppmätt premeabilitet[2] under vissa specificerade betingelser.	DIN 18127
Permeabilitet.	ASTM D 5887 DIN 18130
Utbytbara katjoner {milliekvivalenter per 100 gram}. Eluering med ammonium till mättnad, ny eluering varvid bundet ammonium frigörs och kan bestämmas.	DIN 19684 (som dock angivits inte passa så bra för bentonit[16])
Utbytbart kalcium {milliekvivalenter per 100 gram}. Eluering med överskott av annan katjon samt bestämning av kalcium med sedvanlig kemisk analys (t ex atomabsorbtion).	
Fri svällning {milliliter per 2 gram}. Två gram bentonitpulver hälls i ett mätglas med 100 milliliter vatten. Volymen sediment avläses efter två dygn.	ASTM D5890-95 DIN 18132
Fritt vattenupptag {viktsprocent}. Några gram bentonitpulver placeras på ett filterpapper som ligger på ett poröst stenmaterial som ligger delvis nedsänkt i vatten så att ytan hela tiden hålles fuktig. Uttorkning förhindras genom att en kupa läggs över. Efter några dagar vägs den uppfuktade bentoniten.	ASTM E946 DIN 18132
Vätskeförlust. Ger en uppskattning av hydraulisk konduktivitet	ASTM D5891-95 API 13A/13B
Metylenblåtitrering {milliekvivalenter per 100 gram (men oftare milliliter för viss metodik)}. Bentonit uppslammat i vatten titreras med en lösning som innehåller metylenblått. Metylenblått ersätter utbytbara katjoner kvantitativt. Omslaget visar sig i att inte bara bentonitkornen utan också klarvätskan blir blåfärgad.	VDG P69
Röntgendiffraktion {halt montmorillonit}. Montmorillonit ger upphov till särskilda reflexer, vars intensitet är proportionell mot halten.	
Fukthalt {viktsprocent}. Ca 10 gram torkas i öppet kärl vid 105 °C över natt. Materialet ändrar därvid sina egenskaper och skall inte användas vidare[16].	DIN 18121
Kornstorleksfördelning {viktsandelar}. Torrsiktning.	DIN 18123
Surhetsgrad {pH}. Uppslamning i vatten av 5 viktsprocent bentonit, mätning med konventionell pH-elektrod.	
Vattenhalt.	DIN 18121

[2] Permeabilitet svarar mot *hydraulisk konduktivitet*, vilket är det begrepp som används i denna rapport. Hydraulisk konduktivitet har dimensionen m/s, se avsnitt 6.4.2.

Tabell 5.4a. *Exempel på egenskaper för bentonit och geotextil i några vanligen förekommande kvaliteter av syntetiska lergeomembran.*

Tillämp-ning	Egenskap	Bentomat / Claymax		NaBento RL-S		Bentofix BFG 5000	
		testmetod	mätvärde	testmetod	mätvärde	testmetod	mätvärde
Bentonit	Fri svällning	ASTM D 5890	24 ml / 2g		30 ml / 2 g	ASTM D 5890	25 ml / 2 g
	Halt montmorillonit	röntgen	80 % *		90 ±7 %	röntgen	Ca 90
	Vätskeförlust	ASTM D 5891	18 ml			ASTM D 5891	< 18
	Fritt vattenupptag	ASTM E 496	≥ 650 %			DIN 18132	≥ 600 %
	Metylenblåtitrering					VDG P 69	≥ 300 mg/g
	vattenhalt				10 ±2 %	DIN 18121	≤ 15 %
Geotextil	Vävd, tjocklek	ASTM D 5261	200 g m^2		450 g m^2	DIN EN 965	200 g/m^3
	Icke vävd, tjocklek	ASTM D 5261	105 g m^2		450 g m^2	DIN EN 965	300 g/m^3

* typiskt värde

Tabell 5.4b. *Exempel på egenskaper hos några vanligen förekommande kvaliteter av syntetiska lergeomembran.*

Tillämp-ning	Egenskap	Bentomat / Claymax		NaBento RL-S		Bentofix BFG 5000	
		testmetod	mätvärde	testmetod	mätvärde	testmetod	mätvärde
Bentonitmatta	Permeabilitet	ASTM D 5887	$\leq 5 \cdot 10^{-11}$ m/s		$\leq 5 \cdot 10^{-11}$ m/s	DIN 18130 / ASTM D 5887	$\leq 5 \cdot 10^{-11}$ m/s
	Massa per ytenhet	ASTM D 5261	5.0 kg / m^2†		4,5 kg / m^2	DIN EN 965	4,2 kg/m^3
	Tjocklek i torrt till-stånd				7 mm	DIN EN 964-1	6 mm
	Draghållfasthet	ASTM D 4632	400 N		21-35 kN/m	DIN EN ISO 103 19 / ASTM D 4595	11-20 kN/m
	Töjning vid maximal last	ASTM D 4632	20 %		< 25-30 %	DIN EN ISO 10319 / ASTM D 4595	5-10 %
	Skjuvhållfasthet i svällt tillstånd		2,4 kPa / 30 kPa	LGA 9813742/C1	37,9°		
	Motstånd mot punktering				3000 N	DIN EN ISO 12236	2500 N

† baserat på ett fuktinnehåll på 12 %

5.6.3 Geotextilier

Egenskaper av intresse samt vanliga metoder för karakterisering av geotextilier redovisas i Tabell 5.5. Dessutom kan vissa egenskaper hos ingående material vara av intresse, till exempel smältindex, densitet, draghållfasthet hos fiber och förlängning vid brottgräns samt funktion, kemisk sammansättning och halter av olika tillsatser.

Tabell 5.5. *Egenskaper av intresse samt vanliga metoder för karakterisering av geotextil avsedd för bentonitmatta.*

Metod	**Standard**
Typ av polymer / kemisk sammansättning	
Vävd / icke vävd / geomembran	
Mask[1]- respektive porstorlek[2] {mikrometer}	
Tjocklek {kilo per kvadratmeter}	ASTM D5261 DIN EU 965
Tjocklek {millimeter}	ASTM D5199
Draghållfasthet	ASTM D4632
Förlängning vid maximal last	ASTM D4533
Motstånd mot punktering	ASTM D4833

1 maskstorlek för vävd geotextil
2 porstorlek för non-woven

Exempel på egenskaper för geotextilier i några vanligen förekommande bentonitmattekvaliteter redovisas i Tabell 5.4.

5.6.4 Syntetiska lergeomembran

Egenskaperna hos själva bentonitmattorna kan indelas i dels egenskaper som man mäter som ett led i kvalitetssäkringen vid fabriken, dels egenskaper som är direkt relaterade till mattornas funktion i en deponi.

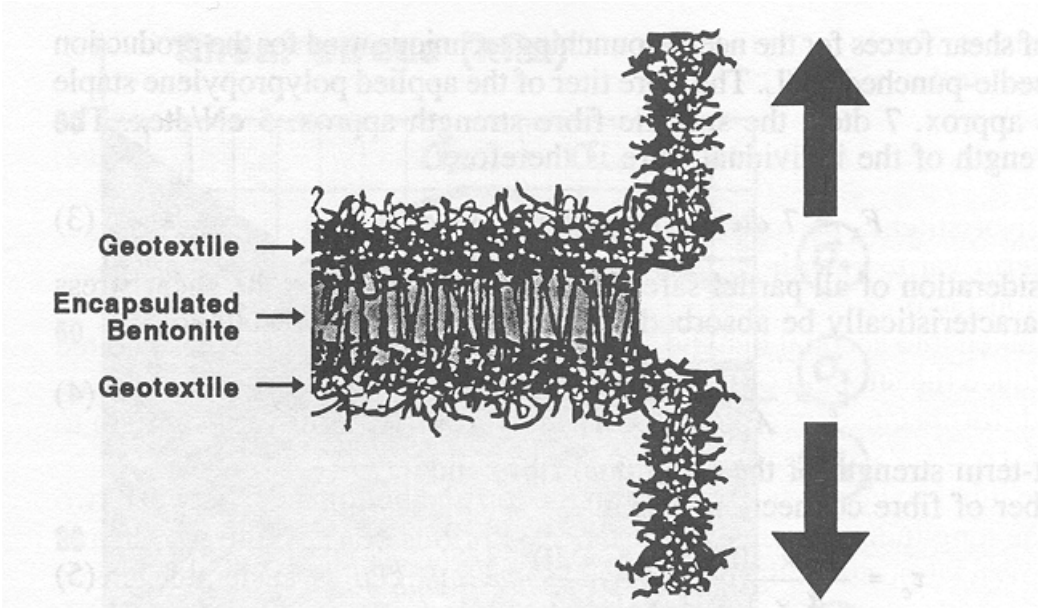
Kvalitetssäkringsrelaterade karakteristika för bentonitmattor redovisas i Tabell 5.6.

Tabell 5.6. *Egenskaper av intresse samt vanliga metoder för kvalitetssäkringsrelaterad karakterisering av bentonitmattor.*

Metod	**USA -standard**	**tysk o/e EU standard**
Massa per ytenhet	ASTM D5261	DIN EN 965 WI 00189066
Gasgenomsläpplighet		ASTM D 5887
Tjocklek	ASTM D5199	DIN EN 964-1
Draghållfasthet	ASTM D4595	EN ISO 10319
Förlängning vid maximal last	ASTM D4595	EN ISO 10319
Motstånd mot punktering	ASTM D4833	DIN EN ISO 12236
Rivstyrka[1]	ASTM D4632	DIN EN ISO 10319
Fukthalt	ASTM D4643	DIN EN
Maxflöde[2] /Permeabilitet	ASTM D5887	DIN 18130
Friktion bentonitmatta - jord	ASTM D 5321	DIN EN 965
Vikt		DIN EN ISO 9663-2

1 Se Figur 5.10; relevant endast för nålfiltad matta
2 Destillerat och avjoniserat vatten

”Peel strength” avser isärdragning av över och underliggande geotextil, se Figur 5.10.



Figur 5.10. Principen för ”peel strength test”. Från [3].

Exempel på egenskaper för några vanligen förekommande bentonitmattekvaliteter redovisas i Tabell 5.4.

5.6.5 Syntetiska lergeomembran på plats i en deponi

Karakteristika för bentonitmattor relaterade till funktionen i en deponi redovisas i Tabell 5.7.

Tabell 5.7. *Karakteristika för bentonitmattor relaterade till funktionen i en deponi.*

Metod	**Standard**	**Kommentar**
Maxflöde	ASTM D5887 DIN 18130	- stor betydelse - helst deponispecifik penetrant - helst deponispecifika tryck och påkänningar - innefattar vattentäthet hos skarvar
Skjuvning	ASTM D5321 prEN ISO 12957 (1 och 2)	- nödvändigt om hög lutning - kan ge mycket olika resultat beroende på mätbetingelser
Fleraxlig påkänning	ASTM D5617 DIN EN	- uppkommer i samband med sättningar
Kryphållfasthet	EN ISO 13431	- se avsnitt 5.7.2
Fleraxlig påkänning	ASTM D5617 DIN EN	- uppkommer i samband med sättningar
Mekanisk kompatabilitet med omgivande lager	ASTM D5818 DIN EN	- för överliggande lager med partikelstorlek > 12 mm - för underliggande lager med partikelstorlek > 12 mm
Kemisk kompatabilitet med omgivande lager	ENV 12224 ENV ISO 12960	
Beständighet gentemot mikroorganismer	ENV 12225	
Beständighet gentemot oxidation	ENV ISO 13438	
Utlakning av vattenlösliga komponenter m m	SIA 280-11	- även uttrokning / återbefuktning - även frysning / tining

5.7 Resultat från undersökningar

5.7.1 Allmänt

I föregående avsnitt (5.6) har redovisats hur ett system etablerats - och byggs upp vidare - för kvalitetssäkring av de olika länkarna i den kedja som leder till en tillförlitlig inneslutning av det avfall inplaceras i en deponi.

Inte i någon av de källor som påträffats har emellertid hävdats att inneslutningen kan visas vara effektiv[3] under mycket långa tider. Däremot har ett stort antal publikationer påträffats vilka belyser olika aspekter av frågan om långtidsbeständighet. Lite förenklat kan man dela in dessa bidrag i följande kategorier:

- beskrivningar av mekanismer, och
- mätningar

Beskrivningarna av mekanismer är generella och gäller såväl för korta som för långa tider. Svårigheten ligger i att kunna veta vilka av alla tänkbara mekanismer som dominerar under långa tider samt vilka värden som skall användas för de parametrar som ingår i respektive modeller.

Mätningar kan utföras endast under en tid som är kort eller mycket kort i förhållande till de långa tider under vilka en deponi är tänkt att fungera. Även om erhållna data är mycket relevanta för korta tider erfordras någon form av teoretisk modell för att extrapolation skall kunna göras till långa tider.

I praktiken behövs det en kombination av förståelse och mätningar (teori och praktik) för att man skall kunna göra lämpliga val av ingående material samt utformning av ett tätskikt.

Syntetiska lergeomembran innehåller nästan uteslutande två slags material vilka har utmärkta egenskaper ur långtidssynpunkt:

- bentonit, och
- polyolefiner (d v s polyetylen, polypropylen m fl)

Båda dessa material har utmärkta egenskaper ur långtidssynpunkt.

---

[3] Till exempel i en säkerhetsanalys liknande dem som tas fram för deponier innehållande kärnavfall.

Tre aspekter har identifierats som särskilt intressanta ur långtidssynpunkt:

- Mekanisk beständighet hos ingående geotextil (polyolefin), se Avsnitt 5.7.2.
- Bentonitens tätande egenskaper, se Avsnitt 5.7.3.
- Skjuvstabilitet i det plan som definieras av bentonitmattan, se Avsnitt 5.7.4.

5.7.2 Ingående geotextilier och polymera material

Syntetiska lergeomembran innehåller geotextilier av bland annat följande skäl:

a bentoniten behöver inneslutas under transport och hantering så att ett den hamnar i ett jämntjockt tätande skikt i deponin

b tilltänkt skjuvstabilitet är högre än den som bentoniten kan ge (vid aktuella densiteter)

c det behövs ett filter mellan bentonit och omgivande material så att inte den förra förloras till den senare

För samtliga punkter ställs krav på mekanisk integritet hos ingående textila material. För b och c krävs dessutom att denna integritet består under lång tid.

Den mekaniska beständigheten i ett korttidsperspektiv kan i mångt och mycket ses som en dimensioneringsfråga. Hållfastheten hos geotextilier och ingående material karakteriseras oftast genom bestämning av draghållfastheten under kort tid.

Aktuella materialtyper - liksom de flesta andra konstruktionsmaterial - uppvisar emellertid en lägre hållfasthet om påkänningen verkar under lång tid. Trots att den kemiska beständigheten generellt sett är mycket god kommer ändå nedbrytning att äga rum efter tillräckligt lång tid. Denna nedbrytning kan verka synergetiskt med mekanisk belastning.

Långtidsegenskaper hos geosynteter avhandlas i många publikationer inom litteraturen och har tidigare sammanställts av bland andra Yvonne Rogbäck [7,21-22] vid Statens Geotekniska Institut (SGI). Hennes genomgång utgår från svenska förhållanden och även rapporteringen är delvis utförd på svenska.

Nedbrytning av polyolefiner

Den vanligaste materialtypen i geotextilier för användning i systetiska lergeomembran är polyolefiner, oftast polyetylen eller polypropylen.

Tänkbara mekanismer för förändringar är som följer[7,23]:

- strålning
- kemikalier
- svällning
- extraktion
- oxidation
- mikrobiell nedbrytning

Ultraviolett strålning från solen bryter ner alla sorters organiska polymerer. Effekten av strålningen reduceras genom tillsats av kimrök (även kallad "carbon black") som består av sot som verkar genom att absorbera strålningen, eller stabilisatorer som minskar effektiviteten i oxidationsprocessen. Utlagda syntetiska lergeomembran bör täckas inom några veckor för att inte påverkas negativt av solstrålningen. I praktiken är detta en hypotetisk fråga eftersom syntetiska lergeomembran bör täckas omgående för att inte ta upp fukt före det att de täcks.

Nedbrytning till följd av kemisk påverkan är troligen den viktigaste typen av fenomen som påverkar långtidsbeständigheten. Denna är också den mest studerade i litteraturen. Syror, baser, oxiderande ämnen, oljor och organiska lösningsmedel med flera typer av ämnen verkar generellt sett nedbrytande på geotextilier. Däremot har salter vanligen ringa effekt. Effekterna är kraftigt beroende av inte bara typ av polymer utan även av vald kvalitet.

Starkt basiska lösningar innehållande natriumhydroxid och kalciumhydroxid uppges [24] påtagligt reducera draghållfastheten hos vissa polyestermaterial men däremot inte hos de polyolefiner som testades (polypropylen). Mekanismen för nedbrytning av polyester är sannolikt hydrolys, vilken katalyseras av såväl syra som bas.

Påverkan av mikrober är mycket långsam, framförallt beroende på att de stora makromolekylerna inte kan upptas i en bakterie utan måste påverkas av något enzym som bakterien i fråga utsöndrar. Under reducerande betingelser har sådan påverkan varit så långsam att den inte gått att mäta.[25]

Mjukgörare, släppmedel och andra tillsatsämnen har lägre molekylvikt och även typer av kemisk struktur som är lättare att angripa.

Ofta tillsätts antioxidanter för att minska nedbrytningshastigheten. Dessa reagerar till exempel med de peroxidgrupper som kan bildas i polymerstrukturerna till följd av luftoxidation. Nedbrytningen blir då långsam till dess att antioxidanten förbrukats, varefter nedbrytningstakten kan komma att bli påtagligt högre.

Polymera material kan ibland absorbera lågmolekylära ämnen. För att en sådan uppsvällning skall ske krävs att det polymera ämnet och det lågmolekylära liknar varandra kemiskt sett. Ett uppsvällt material får förändrade

materialegenskaper och blir exempelvis ofta mjukare och får lägre draghållfasthet.

Lågmolekylära ämnen som finns inbakade i ett polymert material kan diffundera genom polymerstrukturen och bortföras från ytan med ett lösningsmedel. Processen kallas extraktion. Ofta har extraktionsmedlet en svällande verkan på polymeren vilket ökar extraktionen genom att diffusionshastigheten blir högre.

I praktiken är det sannolikt synergier mellan dessa processer som ger upphov till den minst långsamma förändringen. Ämnen som extraherar ur polymermatrisen kan upptas och konsumeras på ytan av bakterier.

Mekaniska egenskaper

Vid kortvariga påkänningar under ett materials plasticitetsgräns sker endast elastisk (återgående) deformation. Långvariga påkänningar under ett materials plasticitetsgräns kan däremot ge upphov till deformation genom krypning.

Krypning innebär att materialet långsamt töjer sig för att till slut brista. Krypproblematiken hanteras vanligen genom en kombination av enstaka mätningar av hållfastheten under lång tid (typprovning) och dimensionering efter en viss andel av korttidshållfastheten. Detta angreppssätt tillämpas även i samband med dimensionering av geotextilier.

Krypning och krypmekanismer har varit föremål för omfattande studier utom såväl utom som inom[2,15,26-28] geoteknikområdet.

Krypning i polymera material kan ge upphov till utveckling av mikrosprickor vilka tillväxer till följd av en kombination av yttre påkänningar och inre spänningar. Förutsättningarna för sprickbildning ökar om halten mjukgörare och andra ämnen minskar eftersom detta både ökar sprödheten och egenspänningarna.

Mikrosprickorna är relaterade till materialens mikrostruktur. Termoplatser som polyetylen och polypropylen innehåller såväl kristallint som amorft material. Det kristallina ligger som öar med amorft material i utrymmena mellan. Mekaniska spänningar i materialet - egenspänningar såväl som spänningar som uppkommer till följd av externa påkänningar - koncentreras till sådana gränsområdena med amorft material. Spänningarna i materialet gör att dessa områden är mera benägna att oxideras än resten av mikrostrukturen. Här tar därför den tillsatta oxidationsinhibitoren slut först. Detta gäller särskilt svetsen och området närmast denna som ju varit uppvämda en extra gång (efter den extrusion som skedde i samband med tillverkningen).

Yttre påkänningar verkar således synergetiskt med oxidation, vilket leder till spänningskorrosion, spricktillväxt och till slut ett sprött brott.

Även duktila brott förekommer. I sådana fall töjer sig materialet tills dess att brottgränsen överskrids. Förloppet anses inte påverkas av den kemiska miljön.

För liknande prover och förhållanden i övrigt ger duktila brott väl reproducerbara brottgränser. Brottgränserna som erhålls i samband med spröda brott har emellertid en hög spridning vilken beror av slumpvis fördelade anomalier i mikrostrukturen.

Diskussion

Utförda undersökningar som finns beskrivna i litteraturen indikerar att den kemiska beständigheten hos ingående geotextilier är mycket god. Även under oxiderande förhållanden sker förändringar mycket långsamt. Vidare bör en seriös leverantör av syntetiska lergeomembran noga ha valt kvalitet med hänsyn till långtidsbeständighet.

I vissa fall kan det finnas anledning att särskilt beakta möjligheterna till reducering av den mekaniska integriteten:

- närvaro av ämnen i avfallet som kan öka nedbrytningen av det polymera metarialet
- närvaro av påkänning som verkar över mycket lång tid
- förhöjd temperatur under lång tid (särskilt om temperaturen hamnar över den så kallade glasomvandlingstemperaturen, T_g)
- närvaro av syre

Beständighet under relevanta betingelser kan testas enligt EPA Method 9090, 1985; ASTM D5322-92).

5.7.3 Bentonitens tätande egenskaper i deponimiljö

Bentonitens egenskaper har tidigare beskrivits i avsnitt 3 och deponins kemiska miljö i avsnitt 4. Här skall i första hand redovisas vissa rekommendationer som arbetats fram i samband med forskning och utveckling avseende användning av lergeomembran.

I deponier där bentoniten kan tänkas komma i kontakt med lakvatten som innehåller ämnen som kan påverka bentoniten och dess funktion ges följande råd [6]:

1 *Bevätning av bentoniten med rent vatten.* Av skäl som beskrevs i avsnitt 5.5 bör detta göras först efter det att täckskiktet anbringats.

2 *Anbringande av ett täckskikt med minst en meters tjocklek*[4].

[4] Jämför med avsnitt 5.5.1 där minst 0,3 meter täckskikt rekommenderas.

Vid utebliven bevätning med sötvatten och efterföljande kontaktande med exempelvis havsvatten sker ingen osmotisk svällning (se Avsnitt 3.2.3) och även den kristallina svällningen blir väsentligt mindre än för sötvatten. Någon tätande gel utvecklas därför knappast.

Visserligen krymper den sötvattenmättade bentoniten när det så småningom kontaktas med exempelvis salt lakvatten, men slutresultatet blir ändå mindre ogynnsamt eftersom mikrostrukturen i detta fall blir mera homogen. Vidare har täckskiktet en positiv effekt genom att svälltrycket ökas, vilket verkar tätande och även reducerande med avseende på mikrostrukturella omvandlingar.

Det pålagda täckskiktet uppges även ha en positiv effekt med avseende på uttorkning/befuktning och frysning /upptining. Uppgifter i litteraturen indikerar [21] att frysning/upptining kan öka genomsläppligheten 2 - 10 gånger, och saltinnehåll i perkolationsvattnet på 0,4 gram natriumklorid per liter kan öka permeabiliteten upp till 20 gånger. Det är emellertid viktigt att observara att sådana förändringar är starkt avhängiga av densitet och svälltryck, vilket diskuterats i Avsnitt 3.

I [6] ges även rekommendationer beträffande användning av syntetiska lergeomembran i kontakt med lakvatten.

1 *Inga begränsningar*
   - 1a Vatten med ett lågt elektrolytinnehåll, elektrisk konduktivitet mindre än cirka 25 mS/m eller ungefär 8° Gh eller 143° Ah. Ett underlag för gränssättningen ges av flockningsgränsen för natriummontmorillonit som är 1,2 - 1,7 millimoler kalciumjoner per liter, vilket motsvarar cirka 0,13 - 0,19 gram (vattenfri) kalciumklorid per liter. (Se även Avsnitt 3.2.3). För natriumjoner ligger motsvarande gräns cirka 10 gånger högre.
   - 1b Vatten med ett lågt elektrolythalt som innehåller opolära organiska vätskor till exempel mineraloljor eller halogenerade kolväten. Dessa ämnen har dels så begränsad löslighet i vatten, dels så svag interaktion med vattenmättad bentonit att inga särskilda problem kan förutses.

2 *Avrådande från användning för långsiktig inneslutning*
   - 2a Koncentrerade opolära organiska ämnen (med lågt dielektricitetstal) till exempel mineralolja, halogenerade kolväten eller etanol
   - 2b Starka syror med pH i lakvattnet lägre än 3
   - 2c Starka baser med pH i lakvattnet högre än 13

3 *Användning först efter provning och/eller särskild utredning*
   - 3a Vatten som innehåller något av följande: hårdhet (det vill säga joner av kalcium och/eller magnesium), järn eller höga halter av joner. Vid konduktivitetet över 100 mS/cm bör Ca^{2+}, Mg^{2+} och Fe^{2+} bestämmas. Om de sammanlagda halterna av tvåvärda joner överstiger 5 - 10 milliekvivalenter bör halterna begränsas.
   - 3b Vatten som i övrigt är rent men som innehåller höga halter av kalium och ammoniumjoner (till exempel mer än 10 milliekvi-

valenter per liter). Närvaro av dessa joner kan leda till strukturella omvandlingar av montmorillonit, varför deras halter bör begränsas. Vid relativt fullständigt utbyte av natrium mot kalium eller ammonium sker en nästan irreversibel kontraktion av molekylskikten i montmorilloniten[6].

3c Vatten innehållande höga halter tungmetaller. I detta fall måste framförallt pH-värdet beaktas eftersom de flesta tungmetaller har en ringa löslighet i pH intervallet 5,5 - 11. Lösningar med sammantaget 3 milliekvivalenter per liter förefaller ge ringa eller acceptabel påverkan under förutsättning av att även koncentrationerna av andra två- och trevärda joner är låga.

3d Vatten innehållande polära organiska föreningar, till exempel metanol, etanol, aceton och etylenglykol, i höga koncentrationer, till exempel större än 10 %.

3e Vatten innehållande höga halter organiska katjoner, det vill säga katjoniska ytaktiva ämnen (till exempel alkylaminer). Sådana katjoner absorberas selektivt i bentoniten och ger därvid upphov till krympning.

I [6] ges också rekommendationen att pH värdet i det vatten som kontaktar bentonit skall vara större än 3 och helst större än 5, men inte högre än 13 och helst lägre än 11. Låga pH-värden i porvattnet leder till upplösning av bentonitens struktur, och höga pH-värden innebär destabilisering och bildning av andra typer av silikater. I annan geoteknisk litteratur anges att pH bör ligga mellan 6 och 10 [29].

Det bör noteras att denna rekommendation utgår från bentonitens funktion på kort och medellång sikt. För bedömningar av utvecklingen på lång sikt kan kunskap och erfarenheter från områdena geologi och mineralogi användas. Olika mineral är stabila i vissa porvattenmiljöer. Som exempel kan nämnas att uppslamningar av bentonit i avjoniserat vatten ger pH-värden strax över neutrala.

5.7.4 Skjuvhållfasthet hos bentonitmattor i deponimiljö

Påkänningar och behov av skjuvhållfasthet

Motståndet mot skjuvning i ett givet plan i mark antas ofta vara linjärt mot den pålagda lasten, det vill säga motståndet kan uttryckas som en konstant plus en friktionskoefficient gånger lasten. Friktionskoefficienten uttrycks ofta som en vinkel. Kohesionen är ett mått på friktionen vid lasten noll och kan sägas vara ett uttryck för materialets "egensammanhållning". I frånvaro av kohesion är friktionsvinkeln den lutningsvinkel som utgör gränsen mellan glidning och stabila förhållanden i det antagna skjuvplanet.

Bakgrundskunskap beträffande deformationsegenskaper hos jord kan erhållas från exempelvis [30].

Påkänningar och behov skjuvhållfasthet i samband med användning av bentonitmattor är betydligt mer komplicerat, men man utgår ändå vanligen från begreppen i ovan beskrivna enkla modell.

Påkänningar på syntetiska lergeomembran uppkommer dels genom att material lagts i form av slänter, dels genom sättningar. Generellt inom geotekniken eftersträvas användning av sättningsobenäget material som dessutom kompakteras innan syntetiska lergeomembran installeras. I allmänhet erhålls därför de största skjuvpåkänningarna till följd av att material lagts upp i form av slänter.

Effekten av påkänningar i slänter motverkas dels genom att lergeomembranen dimensioneras för skjuvning, dels genom att våderna förankras i överänden samt läggs ut i lutningsriktningen.

Denna typ av påkänningar verkar även i en deponi. I en sådan är det emellertid ofta svårt att kompaktera underlaget om det består av avfall, vilket verkar fjädrande och därigenom tar upp energin i de vibrationsrörelser som genereras av kompakteringsutrustningen. Dessutom bryts många typer av avfall ner i deponin vilket leder till strukturförändringar och sättningar (se Avsnitt 4). Dessa kan ofta variera över deponins yta vilken därigenom med tiden kan komma att bli kraftigt ojämn.

Detta innebär att en del av påkänningarna på lergeomembranen kommer att utgöras av dragpåkänningar som är vinkelräta i förhållande till våderna och som också kan verka över vådskarvar.

Inför en dimensionering av ett tätskikt över en deponi behöver man därför klarställa dels slänternas utformning, dels tänkbar topografi efter det att sättningarna ägt rum. En beskrivning av hur man ur sådana data kan uppskatta dragpåkänningarna i ett lergeomembran ges i [15, Avsnitt 6.3.3].

Bestämning av skjuvhållfasthet hos bentonitmattor

Om man söker i litteraturen kring syntetiska lergeomembran och försöker hitta värden att använda för kohesion och friktionsvinkel kommer man att finna många olika värden, samt mötas av svårigheten av att bedöma vilka man skall sätta tilltro till och vilka som kan bedömas vara irrelevanta. Skälet till detta är att det finns många effekter som påverkar resultaten och att de därför är starkt beroende av hur mätningarna utförts. I det följande beskrivs därför kortfattat vilka effekter som kan vara relevanta. Framställningen grundar sig i stor utsträckning på [31] samt även på [1,15,32-37].

Skjuvning i anslutning till en installerad bentonitmatta kan uppträda dels i mattan själv, dels i det övre eller det undre gränsskiktet. Glidning mot angränsande geomembran sker ofta lättare än mot omgivande jord. I litteraturen har endast påträffats referenser avseende glidning mellan syntetiska lergeomembran och geosynteter.

Skjuvning inom ett syntetiskt lergeomembran motverkas av såväl geotextiliernas dragmotstånd som av bentonitens förmåga att motstå skjuvning. Den senare beror av hydratiseringsgrad och normalspänning (det vill säga påkänning vinkelrätt mot mattans plan).

För att skjuvningsförsök skall kunna tolkas krävs att systemet är i jämvikt, det vill säga att vattentrycket i porsystemet i bentoniten (portrycket) är detsamma som i omgivande material och även densamma överallt i bentoniten. Det kan ta viss tid för ett sådant jämviktstillstånd att utveckla sig, bland annat beroende på att vattengenomsläppligheten genom bentonit är så liten. Enligt de undersökningar som gjorts[31] krävs dock längsta tiden för den lägsta normalspänningen och uppgår till nästan en månad.

Detsamma gäller vid ändringar av påkänningen. En förhöjning av normalspänningen ger på kort sikt ett i stort sett oförändrat svälltryck men ett förhöjt portryck. Med tiden pressas dock vatten ur bentoniten och normalspänningen kommer att svara mot svälltrycket.

Ofta är förändringarna i en verklig installation långsamma och jämvikt hinner inställa sig.

En plötslig ökning av normaltrycket från ett lågt värde skulle emellertid innebära att bentonitgel pressas ut genom maskorna i geotextilien. Om det omgivande materialet är ett geomembran kan i sådana fall friktionen mellan skikten bli mycket låg. Om det omgivande materialet är jord, kan bentonit förloras från det syntetiska lergeomembranet till den omgivande jorden.

Av det sagda framgår också att man kan förvänta sig att motståndet mot skjuvning är beroende av skjuvhastigheten. En hög skjuvhastighet innebär att portrycket ökar och att även skjuvmotståndet ökar. Effekten visar sig emellertid endast för låga normalspänningar.

Vid försök med konstant töjningshastighet uppvisar spänningen först ett maximum varefter sker ett alltmer långsamt avtagande med ökad töjning. Förloppet är något olika för olika typer av bentonitmattor och är relaterade till respektive mekanismer för förändringar [34].

För sydda bentonitmattor har följande mekanismer identifierats:

- avdragning av tråden i sömmen
- rivning av geotextilien i en riktning vinkelrät mot vävens huvudriktning

För nålfiltade mattor har följande mekanismer identifierats:

- avdragning av nålfiltningsfibrerna
- urdragning av nålfiltningsfibrerna
- urdragning av fibrer i den icke vävda textilien

Mot bakgrund av den ovan beskrivna komplexiteten kan följande behov identifieras[31]:

- att kunna utföra tester vars resultat är jämförbara oberoende av i vilket laboratorium de utförts
- att kunna tolka resultaten från olika tester utan tvetydighet
- att få fram uppmätta skjuvhållfastheter som representerar verkliga förhållanden i en deponi

För att nå dessa syften rekommenderas följande[31]:

1 Före försöket bör bentonitmattan befuktas till ett tillstånd som svarar mot det i deponin i fråga.

2 När man skall testa friktionsegenskaperna mellan en bentonitmatta och ett geomembran eller en jord bör detta eller denna placeras dikt an mot bentonitmattan så att inte bentonit trycks ut och smörjer i kontaktytan.

3 Förloppet med bevätning och påläggning av normalspänning skall likna det som föreligger i fält (gäller endast sydda och nålfiltade mattor).

4 Vanligen bör kranvatten användas för bevätningen för att så långt möjligt likna verkligt bevätningsvatten. Om bentoniten kan komma att befuktas av lakvatten bör även sådant användas.

5 Bentoniten skall kunna dränera fritt under försöket.

6 Bentonitmattans tjocklek bör följas under försöket. Tjockleken bör anta ett konstant värde som funktion av tiden innan mätningar utförs.

7 Skjuvhastigheten skall vara tillräckligt liten för att full dränering skall komma till stånd.

8 Försöket skall vara så utformat att ett felställe kan utvecklas var som helst i provet.

9 Den maximala förskjutningen skall vara tillräckligt stor för att reststyrkan som provet har efter det att skjuvmotståndstoppen passerats (se texten ovan) skall kunna bestämmas.

10 Skjuvmotståndet skall bestämmas för ett minimum av tre olika normalpåkänningar så att variabilitet och avvikelse från linearitet skall kunna bedömas.

11 Provstorleken har mindre betydelse; såväl små (50 x 50 mm) som stora (305 x 305 mm) prover kan användas.

Diskussion

De värden som erhålls enligt ovan bör kunna användas som underlag vid bedömning av skjuvhållfasthet hos den installerade mattan i verklig deponimiljö.

Följande bör beaktas beträffande påkänningar och behov av skjuvhållfasthet (se inledningen till föreliggande avsnitt):

1 Anläggning av tätskikt och utläggning av mattorna

2 Förekommande sluttningar

3 Förändringar i påkänningarna på bentonitmattan till följd av sättningar i det underliggande deponerade avfallet. Påkänningar vinkelrätt mot vådernas riktning bör särskilt beaktas. (jämför avsnitt 4)

4 Geotextiliens benägenhet till krypning och med denna sammanhängande spänningskorrosion (se avsnitt 5.7.1)

5 Bentonitens förändringar till följd av de ämnen som tillförs porvattnet (se Avsnitt 5.7.2)

Det bör också beaktas att glidning kan förekomma mellan bentonitmattan och omgivande material samt att bentonit under vissa förhållanden kan förloras till omgivande jord.

Något särskilt råd beträffande påkänningar samt skjuvhållfasthet över långa tider har inte påträffats i litteraturgenomgången (annat än det i avsnitt 5.7.1 avgivna rådet om särskild undersökning i vissa fall). De uppgifter som finns indikerar att reduceringen av hållfastheten i aktuella geotextilier med tiden går mycket långsamt och att den mekaniska styrkan upprätthålls över lång tid.

Föjande förefaller dock vara välbetänkt:

- Att undvika differentiell sättning
- Att välja bentonitmatta med god och verifierad kvalitet, bl a beträffande åldringsbeständighet
- Att mätta bentonitmattan med sött vatten
- Att undvika att bentonitmatta utsätts för solljus under längre tid (detta är i första hand aktuellt före läggning)
- Att utforma deponin på ett sådant sätt att mattan inte utsätts för (kraftigt) förhöjd temperatur under lång tid
- Att undvika att bentonitmattan kommer i kontakt med sådana ämnen som ger upphov till snabbare åldring
- Att dimensionera med god marginal så att man ligger långt från materialets gräns för plastisk deformation

Det är vidare mycket gynnsamt med hänsyn till åldring av polymera material om en reducerande miljö kan upprätthållas.

5.8 Slutsatser och rekommendationer

Bentonitmattor är kommersiellt tillgängliga till priser som i många fall kan konkurrera med andra alternativ. Bentonitmattor kan vidare motsvara krav på funktion avseende bland annat vattengenomsläpplighet och skjuvstabilitet samt bibehålla dessa funktioner under lång tid.

Under vissa förhållanden kan dock gas diffundera genom mattan vilket kan innebära inläckage av syre och nedbrytning av avfallet eller utläckage av metan och bakteriell nedbrytning av metanet med förhöjd temperatur som följd.

För bedömningar avseende funktionen samt för kvalitetssäkring och MKB-arbete[5] tillhandahåller seriösa leverantörer underlagsmaterial. Detta innehåller bland annat data från provning samt verifiering av att materialet i fråga är tillverkat i enlighet med det aktuella företagets kvalitetssystem. För bedömningar avseende funktionen finns dessutom en internationell litteratur vilken finns sammanställd i denna rapport.

Mattans funktion är beroende av att utläggningen skett på ett korrekt sätt. Bland annat får inte mattan bli våt förrän efter det att täckskiktet kommit på plats. Det vatten som mattan mättas med första gången bör vara sött.

För sin funktion är bentonitmattan också beroende av att såväl ingående geotextil som bentonit fungerar på tilltänkt sätt. Bentoniten skall ta upp vatten och svälla till ett tätt spärrskikt. Geotextilien skall hålla detta skikt på plats genom sin filterfunktion. Det skall vidare med bidrag från trycket från ovanförliggande jordmassor hålla samman spärrskiktet samt erbjuda motstånd mot svällning. Geotextilien skall också med bidrag från bentoniten erbjuda motstånd mot skjuvning.

Företeelser som påverkar dessa egenskaper hos bentonit respektive geotextil kan ge upphov till nedsatt funktion, särskilt om verkan sker över lång tid.

Av de ämnen som finns eller kan bildas i en deponi påverkas bentonit negativt av lösningar av salter i vatten samt av lågmolekylära organiska ämnen.

De textilier som ingår i bentonitmattor är mycket beständiga i deponimiljö men påverkas ändå långsamt under oxiderande betingelser. Över lång tid sker därför en nedbrytning varvid geotextilmaterialets skjuvstabilitet reduceras samtidigt som filterverkan avtar och bentonit förloras till omgivande material.

[5] MKB = miljökonsekvensbeskrivning

5.9 Referenser

1 Koerner R M, 1997
Perspectives on geosynthetic clay liners. Symposium on testing and acceptance criteria for geosynthetic clay liners. Atlanta, Georgia, 29 January 1996. L W Well Editor. Published by ASTM, Pensylvania, Publication code number 04-013080-38. ISBN0-8031-2471-6.

2 Ingold T S, 1994
The geotextiles and geomembranes manual. Elsevier advanced technology. Oxford. ISBN 1 85617 198 1.

3 Heerten G, Saathoff F Scheu C and von Maugeuge K P, 1995
On the long-term shear behaviour of geosynthetic clay liners (GCLs) in capping sealing systems. International symposium on geosynthetic clay liners, Editors R M Koerner, E Gartung and H Zanzinger, Nürnberg, Germany 14-15 April, 1994. A A Balkema / Rotterdam / Brookfield 1995. ISBN 90 5410 5194.

4 Trauger R and Tewes K, 1995
Design and installation of a state-of-the-art landfill liner system. International symposium on geosynthetic clay liners, Editors R M Koerner, E Gartung and H Zanzinger, Nürnberg, Germany 14-15 April, 1994. A A Balkema / Rotterdam / Brookfield 1995. ISBN 90 5410 5194.

5 Koerner R M and Najero D, 1995
On the bearing capacity of hydrated geosynthetic clay liners. Technical notes, ASCE, Journal of Geotechnical Engineering Dw., Volume 121, Number 1, January, 1995.

6 Egloffstein T, 1996
Bentonite as sealing material in geosynthetic clay liners. Proceedings of the first European geosynthetics conference EUROGEO 1, *Geosynthetics: Applications, design and construction.* DeGroot M B, DenHoedt G and Termaat R J, editors. Maastricht 30 September - 2 October, 1996.

7 Rogbeck Y, Lindmark P och Johansson U, 1994.
Geosynteter. Beständighet och provningsmetoder. Statens Geotekniska Institut, Varia 417 / Sveriges Provnings och Forskningsinstitut, SP Rapport 1994:11. ISBN 91-7848-470-7.

8 Heerten G, 1995
Groundwater protection using a GCL at the Franz-Josef-Strauss airport Munich, Germany. International symposium on geosynthetic clay liners, Editors R M Koerner, E Gartung and H Zanzinger, Nürnberg, Germany 14-15 April, 1994. A A Balkema / Rotterdam / Brookfield 1995. ISBN 90 5410 5194.

9 Kreit V, 1995
Test field for the capping system of the Michelshöle landfill. International symposium on geosynthetic clay liners, Editors R M Koerner, E Gartung and H Zanzinger, Nürnberg, Germany 14-15 April, 1994. A A Balkema / Rotterdam / Brookfield 1995. ISBN 90 5410 5194.

10 Heyer D and Ascherl R, 1995
Design and construction of sealing system with geosynthetic clay liners. Proceedings of the first European geosynthetics conference EUROGEO 1, *Geosynthetics: Applications, design and construction.* DeGroot M B, DenHoedt G and Termaat R J, editors. Maastricht 30 September - 2 October, 1996.

11 Koerner R M, Gartung E and Zanzinger H, editors, 1995
International symposium on geosynthetic clay liners. Nürnberg, Germany 14-15 April, 1994. A A Balkema / Rotterdam / Brookfield 1995. ISBN 90 5410 5194.

12 Well L W, editor, 1997
Testing and acceptance criteria for geosynthetic clay liners. ASTM publication number (PCN) 04-013080-38.

13 DeGroot M B, DenHoedt G and Termaat R J, editors, 1996
Proceedings of the first European geosynthetics conference EUROGEO 1, *Geosynthetics: Applications, design and construction.*. Maastricht 30 September - 2 October, 1996.

14 Carlsson B, Nilsson B, et al, 1999
Tätskikt i mark. Vägledning för beställare, projektörer och entreprenörer. Svenska Geotekniska Föreningen. SGF Rapport 1:99. (Kan beställas genom Statens Geotekniska Institut, biblioteket, Linköping)

15 Koerner M, 1998
Designing with geosynthetics. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Yersey. ISBN 0-13-726175-6.

16 Egloffstein T, 1995
Properties and test methods to assess bentonite used in geosynthetic clay liners. International symposium on geosynthetic clay liners, Editors R M Koerner, E Gartung and H Zanzinger, Nürnberg, Germany 14-15 April, 1994. A A Balkema / Rotterdam / Brookfield 1995. ISBN 90 5410 5194.

17 Foubert F, Dierickx W Delmas Ph, 1995
CE-marking of geosynthetics based on a system of European certification and of European standards. International symposium on geosynthetic clay liners, Editors R M Koerner, E Gartung and H Zanzinger, Nürnberg, Germany 14-15 April, 1994. A A Balkema / Rotterdam / Brookfield 1995. ISBN 90 5410 5194.

18 Von Maubeuge K and Ehrenberg H, 1995
Requirements and design of landfill caps with approved geosynthetic clay. International symposium on geosynthetic clay liners, Editors R M Koerner, E Gartung and H Zanzinger, Nürnberg, Germany 14-15 April, 1994. A A Balkema / Rotterdam / Brookfield 1995. ISBN 90 5410 5194.

19 Zanzinger H, 1995
Quality assurance in the manufacture and installation of GCLs. International symposium on geosynthetic clay liners, Editors R M Koerner, E Gartung and H Zanzinger, Nürnberg, Germany 14-15 April, 1994. A A Balkema / Rotterdam / Brookfield 1995. ISBN 90 5410 5194.

20 Von Maubeuge K, 1995
Manufacturing quality control and specification criteria for geosynthetic clay liners. Symposium on testing and acceptance criteria for geosynthetic clay liners. Atlanta, Georgia, 29 January 1996. L W Well Editor. Published by ASTM, Pensylvania, Publication code number 04-013080-38. ISBN0-8031-2471-6.

21 Rogbeck Y and Rathmayer H,
Durability of geomembranes, test methods. Proceedings of the first European geosynthetics conference EUROGEO 1, *Geosynthetics: Applications, design and construction.* DeGroot M B, DenHoedt G and Termaat R J, editors. Maastricht 30 September - 2 October, 1996.

22 Rogbeck Y, et al, 1994
Test methods for durability of geomembranes, stage 1. SIG Varia 433. Statens Geotekniska Institut, Linköping.

23 LaGrega M D, Buckingham P L and Evans J C, 1994
Hazardous Waste Management, p 807. McGraw-Hill. ISBN 0-07-019552-8.

24 Billing J W, Greenwood J H and Small G D, 1990
Chemical and mechanical durability of geotextiles. Geotextiles, Geomembranes and related products. Balkema, Rotterdam.

25 Palmisano A C and Barlaz M A, 1966
Microbiology of solid waste. CRC Press. ISBN 0-8493-8361-7.

26 Courard L and Rigo J M, 1995
Oxidative induction time: A quality assurance measurement to predict environmental stress-cracking. Proceedings of the first European geosynthetics conference EUROGEO 1, *Geosynthetics: Applications, design and construction.* DeGroot M B, DenHoedt G and Termaat R J, editors. Maastricht 30 September - 2 October, 1996.

27 Horrocks A R, 1995
The effect of stress on geosynthetic durability. Proceedings of the first European geosynthetics conference EUROGEO 1, *Geosynthetics: Applications, design and construction.* DeGroot M B, DenHoedt G and Termaat R J, editors. Maastricht 30 September - 2 October, 1996.

28 Müller-Rockholz J and Koslowski C, 1995
Creep prediction. Proceedings of the first European geosynthetics conference EUROGEO 1, *Geosynthetics: Applications, design and construction.* DeGroot M B, DenHoedt G and Termaat R J, editors. Maastricht 30 September - 2 October, 1996.

29 Pusch R, 1994.
Waste Disposal in Rock, Developments in Geotechnical Engineering 76. Elsevier Publ. Co, 1994 (ISBN:0-444-89449-7).

30 Mitchell J K, 1993
Fundamentals of soil behaviour, 2nd ed. John Wiley & sons. ISBN 0-471-85640-1.

31 Gilbert R B, Scranton H B and Daniel D E, 1997
Shear strength testing for geosynthetic clay liners. Symposium on testing and acceptance criteria for geosynthetic clay liners. Atlanta, Georgia, 29 January 1996. L W Well Editor. Published by ASTM, Pensylvania, Publication code number 04-013080-38. ISBN0-8031-2471-6.

32 Hewitt R D, Soydemir C, Stulgis R P and Coombs M T, 1997
Effect of normal stress during hydration and shear on the shear strength of GCL / textured geomembrane interfaces. Symposium on testing and acceptance criteria for geosynthetic clay liners. Atlanta, Georgia, 29 January 1996. L W Well Editor. Published by ASTM, Pensylvania, Publication code number 04-013080-38. ISBN0-8031-2471-6.

33 Cowland J W, 1997
Design perspective on shear strength testing of geosynthetic clay liners. Symposium on testing and acceptance criteria for geosynthetic clay liners. Atlanta, Georgia, 29 January 1996. L W Well Editor. Published by ASTM, Pensylvania, Publication code number 04-013080-38. ISBN0-8031-2471-6.

34 Fuller J M, 1995
Landfill cap design using geosynthetic clay liners. International symposium on geosynthetic clay liners, Editors R M Koerner, E Gartung and H Zanzinger, Nürnberg, Germany 14-15 April, 1994. A A Balkema / Rotterdam / Brookfield 1995. ISBN 90 5410 5194.

35 Alexiew D and Kirschner R, 1995
On the stability of landfill capping seals using GCLs. International symposium on geosynthetic clay liners, Editors R M Koerner, E Gartung and H Zanzinger, Nürnberg, Germany 14-15 April, 1994. A A Balkema / Rotterdam / Brookfield 1995. ISBN 90 5410 5194.

36 Feki N and Garcin P, 1995
Shear strength tests on geosynthetic clay liner systems. Proceedings of the first European geosynthetics conference EUROGEO 1, *Geosynthetics: Applications, design and construction.* DeGroot M B, DenHoedt G and Termaat R J, editors. Maastricht 30 September - 2 October, 1996.

37 Siebken J R, Swan R H and Yuan Z, 1997
Short-term and creep shear characteristics of a needle-punched thermally locked geosynthetic clay liner. Symposium on testing and acceptance criteria for geosynthetic clay liners. Atlanta, Georgia, 29 January 1996. L W Well Editor. Published by ASTM, Pensylvania, Publication code number 04-013080-38. ISBN0-8031-2471-6.

6 BLANDNINGAR AV BENTONIT, NATURLIGA LERMATERIAL, SCHAKTMASSOR OCH DYLIKT

6.1 Allmänt

De grundläggande fysikaliska lagarna för genomströmning av jordmaterial innebär att kornstorleksfördelningen har avgörande betydelse för den hydrauliska konduktiviteten. I diagram med kornstorleken i logskala på x-axeln och halten av korn i linjär skala på y-axeln svarar den ideala korn-storleksfördelningen mot en parabelkurva med vertex på x-axeln. Moränjord har ofta liknande form på fördelningskurvan och har också funnit användning som tätning i t ex jorddammar. Med ett visst innehåll av lermineral kan, vid tillräckligt hög densitet, moränlera ha så låg hydraulisk konduktivitet som 10^{-11} m/s relativt oberoende av porvattenkemin och sådana naturliga jordmaterial har också använts för täckning av ett antal ytliga avfallsdeponier. De har emellertid vanligen ringa mäktighet och sammansättningen varierar alltid något, vilket innebär att exploateringen tar stor markareal i anspråk och ger låg utnyttjandegrad. Som alternativ kan man framställa sådana jordmaterial genom att blanda olika fraktioner.

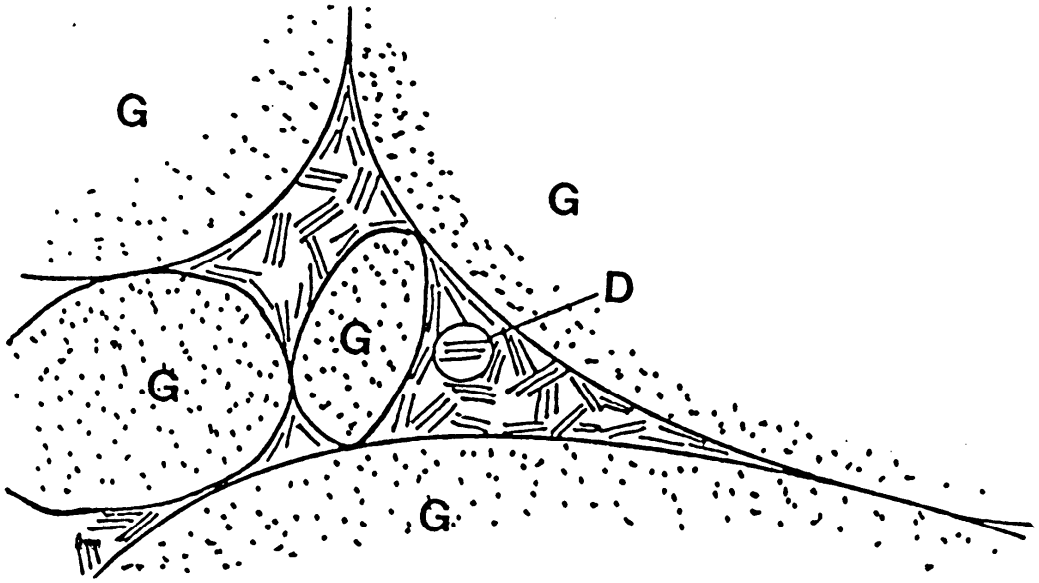
I detta kapitel beskrivs principerna, fördelarna och nackdelarna med på konstgjord väg framställt moränliknande material. Vidare beskrivs naturliga lerrika sediment som utgångsmaterial för framställning av tätbarriärer.

6.2 Blandningar

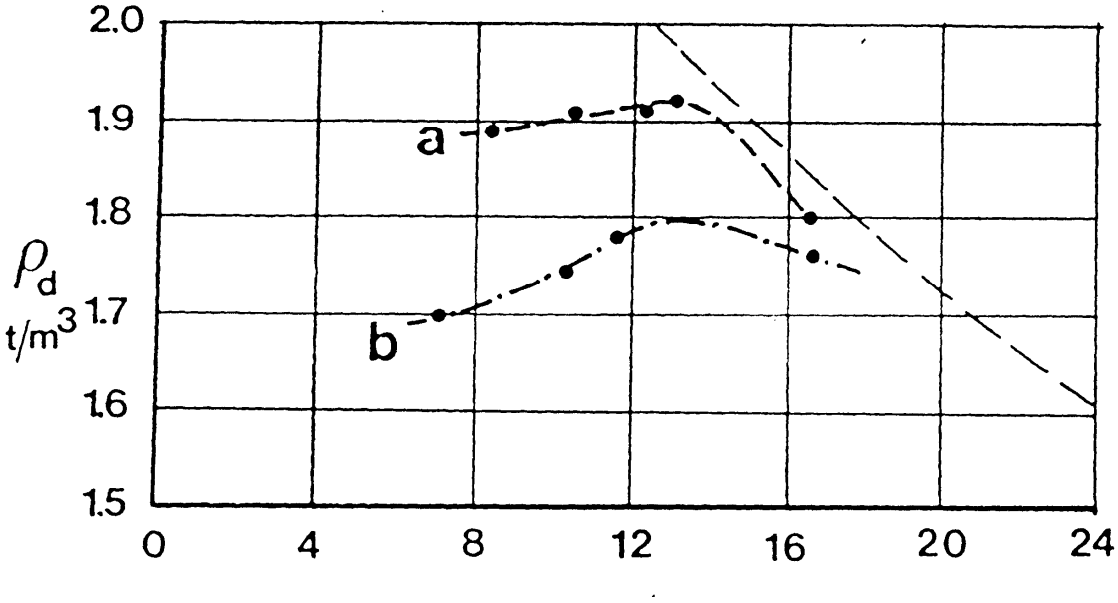
6.2.1 Mikrostruktur

Uppbyggnaden av täta blandningar av en lerkomponent och grövre material (ballast) illustreras av Figur 6.1. Den innebär att det fina lerpulvret blir beläget mellan större partiklar som i sin tur passar in mellan ännu grövre korn.

Blandningen kan göras på flera sätt. En metod är att först blanda lufttorra komponenter och sedan tillsätta vatten för att nå högsta densitet; den häremot svarande vattenkvoten kallas ”optimal”, jfr Figur 6.2. En annan metod, som benämns torrpackning, innebär att komponenterna blandas i lufttorrt tillstånd. Skillnaden mellan förfarandena är att den förstnämnda metoden ger en lerfilm på de grövre kornens ytor, vilket minskar mängden lerpartiklar som kan fylla hålrummen. För att få höggradig hålrumsfyllning måste därför lerhalten vara högre vid ”våtpackning” än vid torrpackning. Det är vanligt att den högsta densiteten är praktiskt taget lika vid både torr- och våtpackning.



Figur 6.1. *Mikrostrukturen hos blandningar av lerpulver. D = Lergranuler (aggregat av lerpartiklar). G = Mineralkorn (kvarts, fältspater), [1].*



Figur 6.2. *Torrdensiteten som funktion av vattenkvoten (i %) vid packning av blandningar med (a) 10 % respektive (b) 30 % bentonit och väl graderad ballast.. Torrdensiteten vid optimal vattenkvot är ungefär samma värde som vid torrpackning med vattenkvoten (w) ca 3 % [1].*

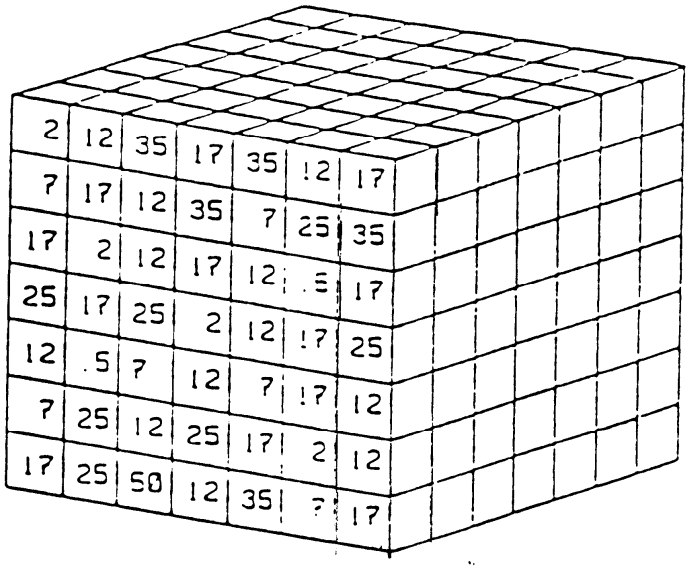
6.2.2 Fysikaliska egenskaper

Erfarenheten visar att blandningar av bentonit och ballast kan få god homogenitet och låg hydraulisk konduktivitet vid laboratorieförsök men att variationer i lerhalt kan ge högre konduktivitetsvärden hos lerlager anbringade i deponier. Det illustreras av Figur 6.3 som visar variationen i hydraulisk konduktivitet hos en blandning av 15 % bentonit och 85 % väl graderad sand.

Typiska värden på hydrauliska konduktiviteten och svällningstrycket ges i Tabell 6.1. Av tabellen framgår att låga lerhalter ger hög konduktivitet och lågt svällningstryck. Det beror främst på att densiteten hos lerkomponenten är låg även vid effektiv packning och hög densitet hos blandningen; i praktiken når den inte över ca 1500 kg/m^3, vilket betyder att sådana blandningar blir känsliga för höga elektrolythalter (jfr. Kap.3). Blandningar med högre lerhalt innebär att grövre korn finns inbäddade i lermaterialet och att effektiv packning ger lerkomponenten högre densitet.

Tabell 6.1. *Hydraulisk konduktivitet (K) och svällningstryck (p_s) hos blandningar av bentonit och ballast [1]. Högsta konduktivitet och lägsta svälltryck gäller för hög elektrolythalt.*

Material, förhållande Na-bentonit/ballast	**Densitet vid vattenmättad, kg/m^3**	**K, m/s**	**p_s, kPa**
10/90	2100	E-8 till E-7	20 till 100
30/70	2100	E-10 till E-9	200 till 500
50/50	2100	E-12 till E-10	1000 till 2000



Figur 6.3. *Schematisk bild av variationen i hydraulisk konduktivitet i en kubikmeterstor volym av en blandning av 15 % bentonit och 85 % sand [1]. Siffrorna skall multipliceras med 10^{-10} m/s för att få konduktivitetsvärdena.*

6.3 Naturliga lerrika jordmaterial

6.3.1 Mikrostruktur

Naturliga jordmaterial med lerinnehåll har använts i många länder som topptätning och bottentätning av ytliga avfallsdeponier. I bl a Spanien, Italien och Frankrike och Tyskland har man tillgång till stora volymer av jordmaterial med en smektithalt av 10-50 % och med sådan kornstorleksfördelning att de efter torkning och malning direkt kan läggas ut och packas på plats i deponier. I nordöstra Tyskland finns t ex mer än 200 miljoner kubikmeter homogen lera (Friedland Ton) med ca 50 % expanderande lermineral som exploateras för bl a det aktuella ändamålet.

6.3.2 Fysikaliska egenskaper

I naturliga lermaterial med relativt hög halt av expanderande lermineral är grövre korn inbäddade i lermatrisen och effektiv packning ger också lerkomponenten hög densitet [2]. Det ger mycket låg hydraulisk konduktivitet och relativt högt svällningstryck, vilket illustreras av Tabell 6.2. Särskilt betydelsefullt är att elektrolythalten spelar en obetydlig roll. I dessa viktiga avseenden är t ex Friedland Ton överlägsen blandningar av smektitrik lera och ballast med 30-50 % lera. Det är viktigt att inse att det utlagda lermaterialet, liksom de ovan beskrivna blandningarna, har en något högre och mer varierande konduktivitet än vad laboratorietester visar. Skillnaden utjämnas dock delvis av att den hydrauliska gradienten är lägre i fält än i laboratorium.

Tabell 6.2. *Hydraulisk konduktivitet och svällningstryck hos naturlig smektitrik lera representerad av den tyska Friedland Ton [3]. Högsta konduktivitet och lägsta svälltryck gäller för hög elektrolythalt.*

Material, förhållande Na-bentonit/ballast	**Densitet vid vattenmättad, kg/m^3**	**K, m/s**	**p_s, kPa**
10/90	2100	E-8 till E-7	20 till 100
30/70	2100	E-10 till E-9	200 till 500
50/50	2100	E-12 till E-10	1000 till 2000

6.4 Diskussion

6.4.1 Allmänt

Blandningar av bentonit och ballast kräver en lerhalt av minst 15-20 % för att få så låg hydraulisk konduktivitet att effektiv tätningsverkan åstadkoms. Om lerkomponenten utgörs av högvärdig bentonit, t ex MX-80, blir materialkostnaden av nästan samma storleksordning som för en naturlig smektitisk lera som Friedland Ton. Lägger man därtill utgifterna för blandningsopera-

tionen och lämpliga lagringsutrymmen blir totalkostnaden högre än för lerrika naturliga leror, som levereras i storsäck för direkt utläggning och packning på platsen. Tar man också hänsyn till att blandningar är känsligare för högre elektrolythalter och lättare råkar ut för piping, d v s lokal stark vattengenomströmning och erosion, är bedömningen i dagsläget att naturliga lerrika jordmaterial bör föredras före blandningar.

När det gäller valet av lämpligaste lerbaserade tätningskomponenter i en deponi kan man därför se naturliga leror som huvudalternativ till bentonitmattor. När det gäller bottentätning kan man av de skäl som getts i Kapitel 3 se blandningar av smektitrik lera och ballast, eller naturliga leror, som främsta alternativ medan särskilda utredningar bör ge besked om vilket alternativ som är lämpligast för topptätning. För det senare ändamålet spelar ju inte vattenkemin någon avgörande roll[1] och därmed kan bentonitmattor komma ifråga. Rörelser hos avfallsmassan kan emellertid bli så stora att lerbaserade lager med flera decimeters mäktighet kan bli nödvändiga. Om gastäthet är önskvärd eller nödvändig är lager av lerrikt material överlägsna syntetiska lergeomembran.

Utläggning och packning av lerbaserade bottentätningar och topptäckningar tar längre tid än utplacering av bentonitmattor, vilket innebär att risken för störningar som följd av nederbörd eller uttorkning blir större. Det förstnämnda förfarandet kräver därför noggrannare planering och mycket rationellt utförande av det slag som man ser exempel på i t ex Tyskland.

6.4.2 Särskilda synpunkter på lerlager

Eftersom lerlager ses som ett vanligt och gott alternativ till de tunnare lermembranen ges kompletterande synpunkter i detta kapitel.

Lermaterialets konstitution

Lager av smektitrik lera med betydligt större mäktighet än lermembranens ringa tjocklek – 0,5 till 1,5 cm – kan användas som topp- och bottentätning och den metoden har i praktiken haft stor omfattning. Lermaterialet framställs genom torkning och malning samt sodabehandling och transporteras i bulk eller storsäck. Kornstorleken bör variera mellan ca 0.01 och 5 mm och vattenkvoten mellan 8 och 15 % för att materialet skall kunna packas till önskvärd densitet. En svårighet med anbringande av lerlager med ensartade egenskaper i topptätningar är att packningen inte blir effektiv om avfallet är starkt kompressibelt. Det beror på att packningsenergin förloras på grund av elasticiteten hos avfallsmassan och kräver att denna förkompakteras och ältas med tunga fårfotvältar.

[1] Användning av aska som täckmaterial kan dock innebära att elektrolythalten i vattnet blir hög.

Genomströmning

Fördelarna med den större tjockleken än vad lermembran kan erbjuda är att genomströmningshastigheten och därmed erosionsrisken blir lägre samtidigt som den kemiska buffringsförmågan och därmed den kemiska beständigheten ökar. Den väsentligaste fördelen vid användning av tillräckligt tjocka lerlager i topptäckningar är emellertid att de förmår uthärda stora ojämna sättningar utan att brista.

Den större tjockleken än vad lermembranen erbjuder har förtjänsten att tätningsfunktionen ökar, vilket kan illustreras med hjälp av transmissiviteten *T* i Ekv. (6.1).

$$T = K\,t \qquad (6.1)$$

där
K = Hydrauliska konduktiviteten i m/s
t = Lerkomponentens tjocklek i meter genomströmningsriktningen

K uttrycks enligt Darcys lag i Ekv. (6.2) som en funktion av hydrauliska gradienten *i* (tryckfallet över tjockleken *t*) och medelgenomströmnings-hastigheten *v:*

$$v = K\,i \qquad (6.2)$$

Den hydrauliska gradienten är en dimensionslös storhet som definieras av höjden vattenpelare (trycket) dividerat med tjockleken hos det tätande och genomströmmade lagret, båda i meter.

Hastigheten *v* är uttryckt som genomflödet *q* dividerat med den genomströmmade ytan A (Ekv. 6.3):

$$v = q/A \qquad (6.3)$$

Typiska värden på transmissiviteten ligger för membran i intervallet 10^{-9} till 10^{-6} m^2/s, eller uttryckt som $m^3/(s \bullet m)$ (d v s volym genomströmmad vätska per sekund och meter tjocklek hos tätningen). Genomflödet minskar sålunda till 5 % om ett 1 cm lermembran ersätts med ett 20 cm lager av samma typ av lera, och ökas tjockleken till 50 cm minskar flödet till 2 %. En avgörande fråga är därför om tätningsfunktionen är tillräcklig hos lermembran eller om man måste tillgripa lerlager.

Diffusiv jontransport

Diffusiv jontransport är den mekanism som ger spridning av lösliga avfallskomponenter genom lerbarriärer även om ingen genomströmning äger rum. Jontransport genom diffusion äger rum i porvattnet (pordiffusion) utmed yttre och inre ytor i lerpartiklarna (ytdiffusion). Den kan uttryckas som i Ekv. 6.4.

$$J = -A\, D_a\, R\, (\delta c/\delta x) \qquad (6.4)$$

där

A = konstant

D_a = Diffusionskoefficienten (”apparent”)

R = $\rho_d\, K_d$ där ρ_d är torrdensiteten och K_d en faktor som bestämmer hur fördelningen är av joner i porvattnet och joner adsorberade på lermineralen.

c = jonkoncentrationen i porvattnet

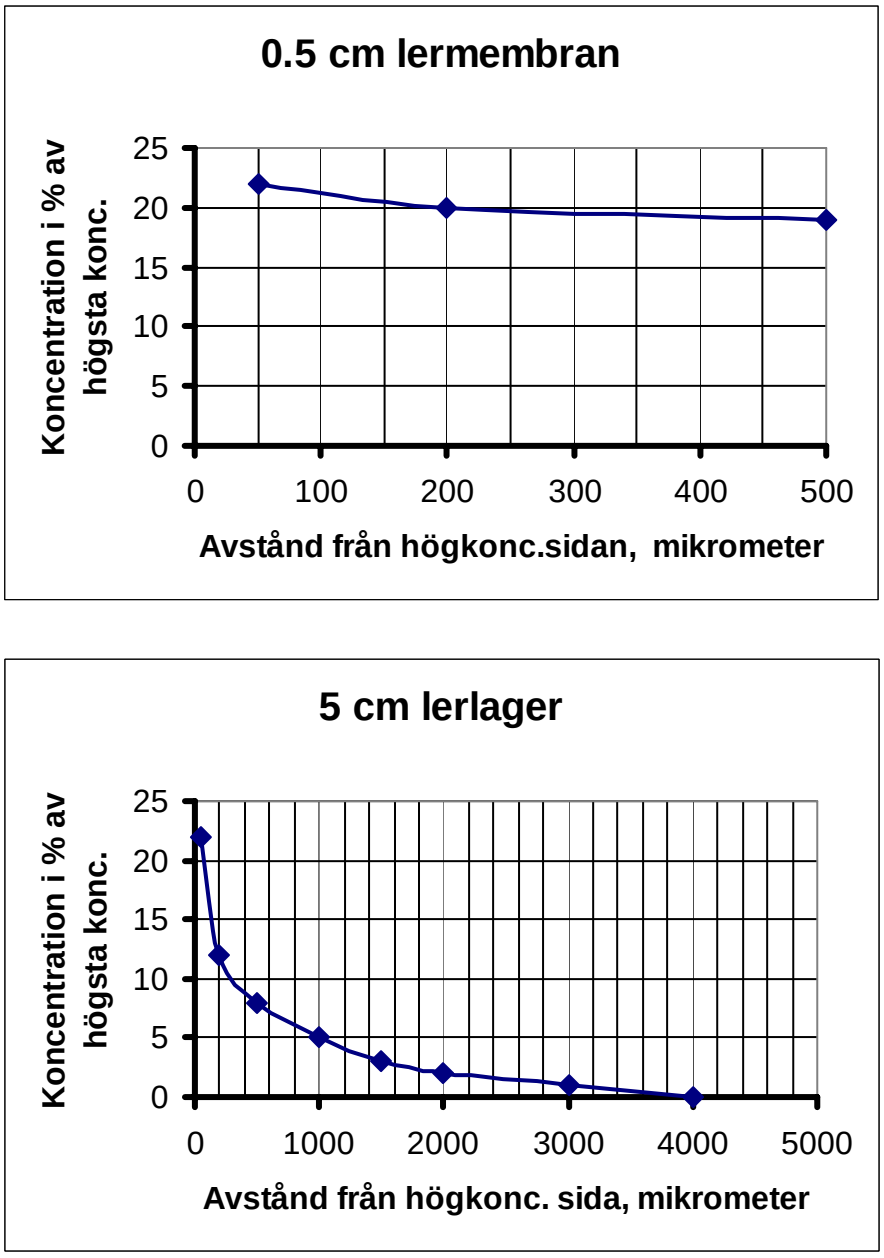
x = avståndet från intransportsidan

I praktiken löser man problemet att beräkna jontransporten med hjälp av numeriska metoder. K_d varierar inom ett stort intervall, <10 liter/kg till >1000 liter/kg, beroende på lerans densitet, lersubstansens jonbyteskapacitet och porvattensammansättning [2]. Relevanta värden på K_d bestäms i laboratorieförsök (”batch” tests). För anjoner gäller att K_d har ett mycket lågt värde beroende på att lerpartiklarnas negativa laddning ger obetydlig bindning till mineralsubstansen.

När det gäller diffusiv jontransport har lertätningens tjocklek ännu större betydelse än vid genomströmning. Det beror på att hastigheten hos jonvandringen i princip är omvänt proportionell mot tjockleken i kvadrat[2]. Det framgår av Figur 6.4, som illustrerar jonkoncentrationen i lerskikt med 0,5 och 5 cm tjocklek 100 dagar efter start. I det tunna membranet har ”genombrott” ägt rum och hela membranet har i det närmaste samma jonkoncentration motsvarande ca 20 % av koncentrationen på intransportsidan, medan fronten hos jonsvärmen endast nått ca 4 cm in i lerlagret med 5 cm tjocklek. Det stora diffusionsmotståndet hos detta lager ger mycket långsam jonpenetration och fördröjningseffekten blir naturligtvis ännu mycket större om tjockleken ökas ännu mer.

Enligt tyska kriterier fordras att lerlager i topptätningar skall ha lägre hydraulisk konduktivitet än $5 \cdot 10^{-10}$ m/s (Deponiklasse II) och läggas ut i lager om högst 0,25 m tjocklek till en total mäktighet av minst 0,5 m. För bottentätningar skall den hydrauliska konduktiviteten också vara lägre än $5 \cdot 10^{-10}$ m/s och de skall läggas ut i lager om högst 0,25 m tjocklek till en total mäktighet av minst 0,75 m (Deponiklasse II). Man finner att Friedlandlera med en densitet av 1830 kg/m^3 uppfyller dessa kriterier.

[2] Detta gäller initialskedet (som dock kan pågå mycket länge). Vid fortvarighet är jonvandringen omvänt proportionell mot tjockleken.



Figur 6.4. *Jämförelse av jonkoncentrationen efter 100 dagar i ett lermembran med 0,5 cm och 5 cm tjocklek. Diffusionskoefficienten D_e är E-11 m^2/s och K_d 600 l/kg. Densiteten hos lermaterialet är 1800 kg/m^3. Beräkning med koden Anadiff (Trygve Eriksen, KTH). Fallet representerar t ex katjonen strontium.*

6.5 Slutsatser

De allmänna teoretiska sambanden mellan tryck, genomsläpplighet och vattenkemi stämmer i princip med laboratoriebestämda data för bentonitmaterial inklusive bentonitmattor som därför kan användas som botten- och topptätningar om vattenkemin, d v s innehållet av oorganiska och organiska ämnen, ger acceptabelt låg genomsläpplighet och beständighet. I praktiken finns emellertid begränsningar, i första hand genom risken för punktering i samband med anbringande och också genom att bentonitisoleringar av deponier utsätts för rörelser som kan ge mekanisk förstörelse. Det innebär att "mekanisk buffring" bör eftersträvas vid täckning av kompressibelt avfall, vilket innebär att bentonittätningen ges tillräcklig tjocklek – i praktiken flera decimeter. För lågkompressibla, väl packade avfallslager kan dock bentonitmattor komma ifråga. För bottentätningar, som ju inte är åtkomliga för eftertätning, är det angeläget att skapa marginaler och få till stånd god kemisk buffring, vilket utesluter bentonitmattor och ger preferans för på platsen anbringade bentonitbaserade tätningar med tillräcklig tjocklek - i praktiken flera decimeter.

Särskilda synpunkter vid isolering med bentonitmattor för topptätning, vilket förutsätter lågkompressibelt avfall, är:

- Utläggningen skall ske så att risken för punktering elimineras (jfr Avsnitt 5).
- Stabilitetsvillkoren för slänter med bentonittätningar måste uppfyllas; det innebär att skjuvhållfastheten hos bentonitlager och bentonitmattor måste vara tillfyllest med hänsyn till totaltryck och porvattentryck.
- Om gasproduktionen i avfallsmassan är så stor att bentonitmattorna inte medger avgång genom diffusion eller långsam intermittent strömning måste särskild ventilation anordnas.

Särskilda synpunkter vid isolering med lerlager för topptäckning och bottentätning är:

- Mycket god blandning måste åstadkommas för att homogeniteten hos blandningar av bentonitpulver och ballastmaterial skall vara tillfyllest. (Detta kräver exempelvis tvångsblandare). Naturliga leror med tillräckligt smektitinnehåll är att föredra från teknisk och funktionsmässig synpunkt.
- Utläggning och packning på starkt kompressibelt avfall måste ske så att avsedd densitet hos materialet erhålls (jfr Avsnitt 4 och 5).
- Stabilitetsvillkoren för slänter med bentonittätningar måste uppfyllas; det innebär att skjuvhållfastheten hos bentonitlager måste vara tillfyllest med hänsyn till totaltryck och porvattentryck.

Om gasproduktionen i avfallsmassan är så stor att topplager av bentonit inte medger avgång genom diffusion eller långsam intermittent strömning måste särskild ventilation anordnas.

6.6 Referenser

1 Pusch R, 1994.
Waste Disposal in Rock, Developments in Geotechnical Engineering 76. Elsevier Publ. Co.

2 Pusch R, Muurinen A, Lehikoinen J, Bors J, Eriksen T, 1999.
Microstructural and chemical parameters of bentonite as determinants of waste isolation efficiency. European Commision, Final report of Contract No. F14W-CT95-0012.

3 Pusch R, 1998.
Backfilling with mixtures of bentonite/ballast materials or natural smectitic clay? SKB Technical Report TR-98-16.

7 ANVÄNDNING AV BENTONIT I SVENSKA DEPONIER

RVF Svenska Renhållningsverksföreningen har skickat ut en enkät med frågor beträffande hur bentonit i olika former används i svenska deponier. Resultatet framgår av Tabell 7.1.

Enketen har följts upp med intervjuer med flertalet av användarna. I samband med dessa intervjer har vissa justeringar och kompletteringar gjorts. I Tabell 7.1 redovisas läget efter dessa justeringar.

Vid intervjuerna ställdes bland annat följande frågor:

- För vilken eller vilka tillämpningar har bentonit använts?
- Vilken utformning har det gällt?
- I vilken form har bentoniten använts?
- Vilka skäl har förelegat för val av just bentonit?
- Vilka erfarenheter finns beträffande markarbetena?
- Vilka erfarenheter finns beträffande funktionen efter färdigställandet?
- Vad i övrigt kan vara värt att notera?

Resultatet av intervjuerna är i sammandrag som följer.

Bentonit har använts i en mångfald av tillämpningar: bottentätning, topptätning, separation av akvefärer samt tätning i diken och dammar. Bentonit ingår i deponier i samtliga klasser.

Utformningarna har varierat beroende på framför allt tillgång till övriga material för den geotekniska konstruktionen. I de fall där lera, lerig morän och liknande funnits tillgänglig lokalt har bentonit använts i den kanske mest effektiva barriären ur hydraulisk synpunkt, och lokal naturlig lera har används som komplement och för redundans.

Bentonit har använts i följande former:

- Ren bentonit som slammats upp med vatten och applicerats som tätskikt i dammar och diken med ovanpåliggande skyddsskikt av annat material.
- Bentonitmatta
- Blandning med sand, eventuellt med högt innehåll av finkorningt material. Bentonithalten har varit ca 4 % räknat som torrvikt.
- Blandning med flygaska från förbränning av kol

Som skäl för valet av bentonit har i första hand angivits att bentonit ger en mycket god tätning. Av stor betydelse för valet har också varit att bentonit är ett naturmaterial som behållit sin stabilitet över mycket långa tider. Vidare har

angivits att bentonit har en god kemisk stabilitet i förhållande till de ämnen som förekommer i miljön i fråga.

Många av de tillfrågade har betonat vikten av följande:

- Att den utformning som valts är lämplig och ändamålsenlig
- Att det finns en tydlig planering beträffande hur de olika arbetsmomenten skall utföras
- Att man antingen anlitar en välrenommerad entreprenör eller utför arbetena i egen kompetent regi
- Att stor noggrannhet och omsorg iakttas så att installationen till alla delar blir utförd på ett korrekt sätt. För detta har i många fall särskilda kvalitetsprogram tillämpats.

I ett fåtal fall har angivits att erfarenheterna inte varit god till alla delar. I dessa har avvikelse förekommit i förhållande till punkterna ovan.

I övrigt har noterats att det finns ett stort intresse för frågor kring utformning av tätskikt särskilt mot bakgrund av de ökade krav som följer av nya EU-direktiv. Detta intresse gäller inte minst användning av material som innehåller bentonit som aktiv komponent.

Tabell 7.1. *Användning av bentonit vid svenska deponier 2001. Enkät från RVF Svenska Renhållningsverksföreningen skickad till de 100 största deponierna. Antal negativa svar 59.*

Kommun	**Deponi**	**Användningsområde**	**Uppgiftslämnare**	**Telefonnummer**	**Faxnummer**
Fagersta	Fagersta	Dammar, Tätning i anknytning till filter	Kjell Skansar	021-163 526	021-335 150
Falun	Falu Avfalls-anläggning	Topptätning	Micael Andersson	023-831 72	023-284 27
Gotland	Slite och Visby	Bottentätning	Sverker Lindberg	0498-567 755	0498-203 599
Gävle	Forsbacka	Dammar, Lakvattenmagasin (bentonitmatta + morän), Täckning av förorenade jordar (bentonitmatta + sand + morän), Askdeponi m bentonitmatta	Olle Andersson	026-300 50	026-300 54
Helsingborg	Filborna	Tätning av gasbrunnar (pulver)	Tommy Ohlsson	042-107 748	042-107 793
Huddinge	Sofielund	Topptätning, Dammar, Tätvallskonstruktion vid släntfot	Elisabeth Svensson	08-608 90 64	08-608 90 15
Karlshamn	Perstorp kl 1	Topptätning	Percy Blom	0455-783 60	0454-882 14
Kramfors	Högberget	Dammar	Kjell Larsson	0612-800 00	0612-149 24
Kristinehamn	Strandmossen	Avskärande tätningar i mark	Åke Bergström	0550-881 35	0550-103 07
Malmö	SYSAV	Bottentätning (bentonit + sant samt naturlig lera)	Kent Björk	040-680 19 54	040-680 19 90
Nacka/Värmdö	Kovik	Bottentätning, Topptätning, Dammar	Håkan Nordgren	08-519 333 20	08-519 331 49

(Fortsättning nästa sida)

Tabell 7.1, fortsättning. *Användning av bentonit vid svenska deponier 2001. Enkät från RVF Svenska Renhållningsverksföreningen skickad till de 100 största deponierna. Antal negativa svar 59.*

Sigtuna	Brista	Tätning i dammlucka	Per-Erik Karlsson	08-591 261 57	08-591 261 89
Simrishamn	Måsalycke	Dikestätning (flygaska + bentonit)	Lars-Erik Arvidsson / Bo Persson	0414-608 60	0414-605 61
Skara	Rödjorna	Topptätning, Lakvattenmagasin, Botten-tätning (bentonit 4% + sand) klass 1	S-Å Heimar	0511-245 12	0511-245 11
Skinnskatteberg	Skinnskatteberg	Dammar	Kjell Skanser	021-163 536	021-335 150
Sundsvall	Blåberget	Bottentätning	Hans Erik Olsson	060-191 973	060-178 315
Uppsala	Hovgården	Bottentätning, Tätning mellan berg och spånt	Marina Johnsson	018-274 256	018-693 076
Vallentuna	Löt Avfalls-anläggning	Bottentätning (bentonit 4 % + bergkross)	Herman Brundin	08-511 80 600	
Växjö	Häringetorp	Tätning mellan ytterdike och lakvattendike	Kjell Arvidsson	070-606 54 19	0470-678 92

8 SLUTSATSER

8.1 Allmänt

Topptätning och bottentätning av deponier kan utföras med syntetiska lergeomembran - i dagligt tal kallat bentonitmattor - samt med naturliga leror eller med blandningar innehållande naturliga leror.

Tätskikten kan ges en sådan utformning att de uppfyller olika krav avseende i första hand motstånd mot genomströmning av vatten samt avseende släntstabilitet. Dessa krav skall uppfyllas med hänsyn taget till framförallt följande omständigheter:

- topografiska förhållanden och förekommande sättningar
- varierande tillgång till vatten
- frysning och upptining
- vattenkemi
- gasbildning
- värmeutveckling

För bedömningar avseende funktionen samt för kvalitetssäkring och MKB-arbete avseende bentonitmattor tillhandahåller seriösa leverantörer underlagsmaterial. Detta innehåller allmänt kunskapsunderlag, data från kvalitetssäkring och provning samt installationsbeskrivningar. Det finns också en omfattande internationell litteratur vilken finns sammanställd i denna rapport.

Den föreliggande rapporten kan utnyttjas i samband med utformning av tätskikt innehållande naturliga leror eller med blandingar innehållande naturliga leror. För sådana fall erfordras individuella lösningar i högre grad än för bentonitmattor.

Tätskikt med blandningar av bentonit och ballastmaterial får ofta en lägre homogenitet än tätskikt av ett naturligt lermaterial. Det innebär att sådana tätskikt får en högre variabilitet i sina egenskaper jämfört med syntetiska lergeomembran vilka ofta har en mycket jämn kvalitet.

8.2 Utvecklingen under lång tid

Behovet av att kunna förutse utvecklingen över lång tid

Det finns inte angivit någon bortre gräns i tid efter vilken uppställda krav inte skulle vara tillämpbara. Inte heller finns det någon begränsning i tiden för deponiinnehavarens ägaransvar. Om en tätning i en deponi inte skulle kunna visas fungera efter en tid är det en påtaglig möjlighet att det blir deponiägaren som får stå för återställande av funktionen och med detta sammanhängande kostnader.

Den teknik som finns tillgänglig för kontroll och instrumentering av täthetsfunktionen är mätning av flöde i dränagevattnet. Genom sektionering av dränagesystemet finns möjlighet att identifiera inom vilket område på en deponi som tätskiktet läcker men inte i vilken exakt position. Sådan uppföljning förutsätter naturligtvis att dränagesystemet förblir intakt över tid och inte blockeras.

Det är alltså viktigt för den deponiägare som överväger att installera syntetiska lergeomembran eller tätskikt innehållande blandningar av bentonit och annat material att kunna överblicka utvecklingen över tid. Denna kan vara ganska varierande beroende på vad deponin innehåller och på tätskiktets egenskaper inklusive egenskaperna hos ingående bentonit.

Det är önskvärt att utveckla en teoretisk modell för frigörandet och transporten av oönskade kemiska element från avfallsmassan genom bottentätningen och vidare ut i omgivningen.

Utvecklingen i avfallet i en deponi under lång tid

Många deponier innehåller sättningsbenäget material. Olika typer av material uppvisar stor skillnad i sättningsbenägenhet. Oförbränt hushållsavfall har en hög kompressionsbenägenhet medan aska från förbränning av avfall har relativt låg kompressibilitet. Benägenheten till sättning avtar med tiden.

I en deponi bildas med tiden ämnen som löser sig i lakvattnet och påverkar bentoniten negativt. Detta gäller framförallt askor från förbränning men även obehandlat hushållsavfall. Ofta innehåller lakvattnet lösta salter vilka påverkar egenskaperna hos bentonit.

Utvecklingen av tätskiktet under lång tid

Tätningsförmågan (med avseende på läckage av vatten) i ett tätskikt ökar med ökat svälltryck (= totaltryck - hydrostatiskt tryck). Man skulle därför kunna vänta sig att bottentätningar blir tätare än topptätningar. Effekten motverkas emellertid av att lakvattnet ofta innehåller ämnen som försämrar bentonitens tätande förmåga, varför i synnerhet bottentätningar som innehåller tunna skikt av bentonit kan befaras läcka med tiden.

Tätskikt med naturliga leror eller med blandingar innehållande naturliga leror bedöms ha bättre förutsättningar att fungera tillfredsställande jämfört med bentonitmattor i de fall där lakvattnet innehåller lösta ämnen som kan påverka skiktens täthet. Skälet till den lägre kemiska känsligheten är främst ökad kemisk buffertverkan på grund av den större massan. Man kan reducera den negativa inverkan av vissa lösta ämnen genom att använda kalciumbentonit men den har högre hydraulisk konduktivitet och kräver därför applicering i tjockare lager.

Bentonit i topptätningar löper mindre risk att utsättas för lakvatten som innehåller ämnen som påverkar motståndet mot vattengenomströmning. I topptätningar kan emellertid tätningarna utsättas för dragkrafter till följd av differentiella sättningar.

Sådana krafter kan vara ogynnsamma för tätskikt med bentonitmattor eftersom de ofta verkar i annan riktning är vådernas längdriktning. I längdriktningen är våderna förankrade i mark, men i tvärriktningen föreligger normalt endast ett visst överlapp utan någon mekanisk förankring.

Förmågan att motstå dragning i och kring ett tätskikt är för bentonitmattans del beroende av att ingående polymera material behåller sin mekaniska integritet. Dessa består av polyolefiner som är mycket stabila, särskilt i reducerande miljö.

Tätskikt med naturliga leror eller med blandingar innehållande naturliga leror bedöms ha bättre förutsättningar att fungera tillfredsställande jämfört med bentonitmattor i samband med differentiella sättningar. Skikten är tjockare och bedöms kunna följa med i de rörelser som sker.

Vissa ämnen, till exempel gaser, kan relativt lätt ta sig igenom tunna tätskikt med hjälp av diffusion. Detta inkluderar luft som bör förhindras att tränga ned till avfallet därför att oxiderande förhållanden är oönskade; ett förhållande som talar för att topptätningen skall byggas av lerlager med betryggande tjocklek.

Deponin bör ges en sådan utformning att uttorkning och uppkommande temperaturer och temperaturskillnader inte ger upphov till någon påtagligt försämrad funktion hos tätskikten, t ex genom att anbringa tillräcklig täckning Bakteriell oxidation av metan som utvecklas i deponin kan äga rum nära tätskikt och ge upphov till kraftigt ökad temperatur lokalt.

Senaste kunskapstillskott

I samband med slutredigeringen av denna rapport har nya intressanta rön framkommit vilka redovisas i Bilaga E. I bilagan görs en jämförelse mellan följande material:

- Friedland Ton, som är en kalciumbentonit med jämförelsevid lågt smektitinnehåll och hög halt av annat finkornigt material.
- Sand med inblandning av natriumbentonit med ett högt smektitinnehåll

Slutsatserna i korthet är som följer:

- Friedland Ton har en god packningsbarhet inom ett stort vattenhaltsintervall.
- Friedland Ton har är självtätande genom att mycket fina partiklar frigörs och täpper igen förekommande mikroporer.
- För ren natriumbentonit blandad med sand får man i stället beakta risken för att finkornigt material tvättas ut och transporteras bort.

8.3 Rekommendationer beträffande utformning och drift av deponier

Nedanstående rekommendationer beträffande utformning och drift av deponier följer av de slutsatser som dragits i föregående avsnitt.

- Lägg upp en generell strategi för hela åtagandet redan samband med projekteringen. Stragegin bör bland annat innefatta huvuddragen i de efterföljande stegen.
- Välj en seriös leverantör av syntetiska lergeomembran som kan:
  - ange relevanta data för produkten vilka motsvarar uppställda krav
  - visa att dessa värden innehålls genom ett kvalitetssäkringsprogram
  - tillhandahålla en adekvat instruktion för installationen
- Alternativt utveckla metodik för användande av blandningar av bentonit och annat material. Utnyttja innehållet i denna rapport för att göra en checklista över aspekter som bör beaktas, till exempel
  - utprovning av blandningar till önskade egenskaper
  - säkerställande att materialen inte påverkar varandra på något oönskat sätt
  - utprovande av blandningsmetodik[1]
  - vilka krav som skall gälla för homogenitet i makroskala och hur materialhanteringen skall gå till för att adekvat homogenisering skall erhållas
- Välj en seriös och kompetent installatör / entreprenör. Exempelvis behöver beaktas att en bentonitmattas funktion är beroende av att den applicerats i torrt tillstånd och att ett täckskikt anbringas innan mattan fuktas med rent vatten.
- Beakta hur system för övervakning bör läggas upp med hänsyn till de behov som kan föreligga av att kunna visa att systemet fungerar över långa tider samt behovet av att kunna lokalisera eventuellt läckage.
- Identifiera, analysera och bedöm de förändringar som kan uppkomma i tätskikt över tid i varje specifikt fall. Använd resultatet som underlag för att välja typ av tätskikt, utformning, med mera. Utnyttja innehållet i denna rapport för att göra en checklista över aspekter som bör beaktas, till exempel
  - porvattnets (lakvattnets) innehåll
  - differentiella sättningar
  - gasdiffusion
  - påverkan genom frost, uttorkning, förhöjd temperatur med mera
- Beakta att syntetiska lergeomembran endast funnits på marknaden under drygt ett decennium. Det bedöms därför vara rimligt att räkna med att erfarenheterna från tillämpningarna kommer att innefatta negativa aspekter som man inte förutsett fullt ut från början. Denna rapport innehåller ett antal exempel på sådana tänkbara aspekter.

---

[1] Torra pulverformiga material blandar sig inte utan vidare i mikroskala till följd av agglomerering.

8.4 Rekommendationer beträffande fortsatta utrednings- och utvecklingsinsatser

Den genomförda studien har klarlagt den principiella funktionen hos bentonitbaserade material för deponitätning och också givit ett allmänt underlag för val av lämpliga material och tekniker. En logisk fortsättning av studien borde omfatta följande punkter:

- Utförande av fälttester på begränsade ytor med användning av olika tätningsmetoder för jämförelse och för kalibrering av beräkningsmetoder
- Utveckling av beräkningsmetoder för förutsägelse av lakvattenmängder och grundvattenkontaminering som underlag för design
- Teknisk/ekonomisk optimering av deponitätning
- Utveckling av metodik för blandning av bentonit och annat material.
- Bestämning av dominerande mekanismer för nedbrytning av bentonitmattor. Försvinner den mekaniska funktionen först (med risk för jordskred), eller försvinner bentoniten först och tas upp av den omgivande jorden (med påföljd att tätningsfunktionen försvinner)? Det bör framhållas att enligt dagens kunskap uppträder sådana fenomen först efter mycket långt tid.
- Bentonitens mineralogiska stabilitet i olika tätskiktsmiljöer. En intressant fråga är till exempel om bentonit kan blandas med aska trots det höga pH-värde som aska kan ha.
- Utarbetande av praktiska regler för material- och teknikval, byggande och kvalitetssäkring av komponenter och färdig förslutning.
- Utveckling av en teoretisk modell för genomströmning och frigörelse av oönskade ämnen från avfallet. Med dess hjälp kan man dels välja lämpligaste tätningskomponenterna, dels bedöma hur olika degraderingsprocesser kan förändra isoleringsförmågan efter olika lång tid.

FALLSTUDIE HÖGBYTORP

Anders Kihl

Ragn-Sells Avfallsbehandling AB

Innehållsförteckning

Om denna fallstudie **3**

Allmänt **3**

Bottentätning **4**

Utläggning av avfall **4**

Temperatur **5**

Lakvatten **5**

Avfallskarakterisering **6**
Densitet och tryckhållfasthet 6
Hydraulisk konduktivitet 7
Porpressvatten 8
Utlakningsförlopp 8

Framtida användning av bentonitmattor som bottentätning inom Område 2 **9**
Salter 9
Tungmetaller 9
Svälltryck och densitet – praktiska konsekvenser 10
Slutsatser 10

Bilagor
Bilaga 1. Översiktskarta över område 2
Bilaga 2. Delområden inom område 2
Bilaga 3. Planerat system för uppsamling av lakvatten för delområde 3 och 4.
Bilaga 4. Resultat från ULP-test

Om denna fallstudie

Alla faktauppgifter rörande egenskaper hos stabiliserad aska såsom densitet, hållfasthet, hydraulisk konduktivitet etc. som redovisas i denna fallstudie är hämtade ur rapporter från projektet *Stabil deponiprodukt* som genomfördes av Ragn-Sells Avfallsbehandling AB tillsammans med Cement och Betong Institutet, CBI, under 1991-1995.

Allmänt

Inom Område 2 Högbytorp deponeras uteslutande stabiliserad aska. Olika askor blandas enligt särskilda recept och deponeras. Den färdiga deponiprodukten härdar ihop till ett betongliknande material. Tillredning av deponiprodukten sker i en särskild prepareringsanläggning. Prepareringsanläggningen är en modifierad betongfabrik. Anläggningen är försedd med fyra fackindelade silos, där olika typer av askor kan lagras separat. Från de olika lagringsfacken matas askor i bestämda proportioner till en blandare. I blandaren tillsätts vatten. Huvudingrediensen i recepten är kolaska från Värtaverket i Stockholm. Denna aska har goda puzzoloana egenskaper och fungerar som bindemedel. Det vatten som används i prepareringsanläggningen är lakvatten från Område 2. Lakvattnet täcker inte behovet fullt ut varför vatten från två borrade brunnar till viss del används. I anslutning till prepareringsanläggningen finns en vattenreservoar dit uppsamlat lakvatten från lakvattendammen pumpas. I dagsläget stabiliseras och deponeras sju olika typer av bädd- och flygaska. Blandningsförfarandet är datorstyrt. I bilaga 1 finns en översiktlig karta över område 2.

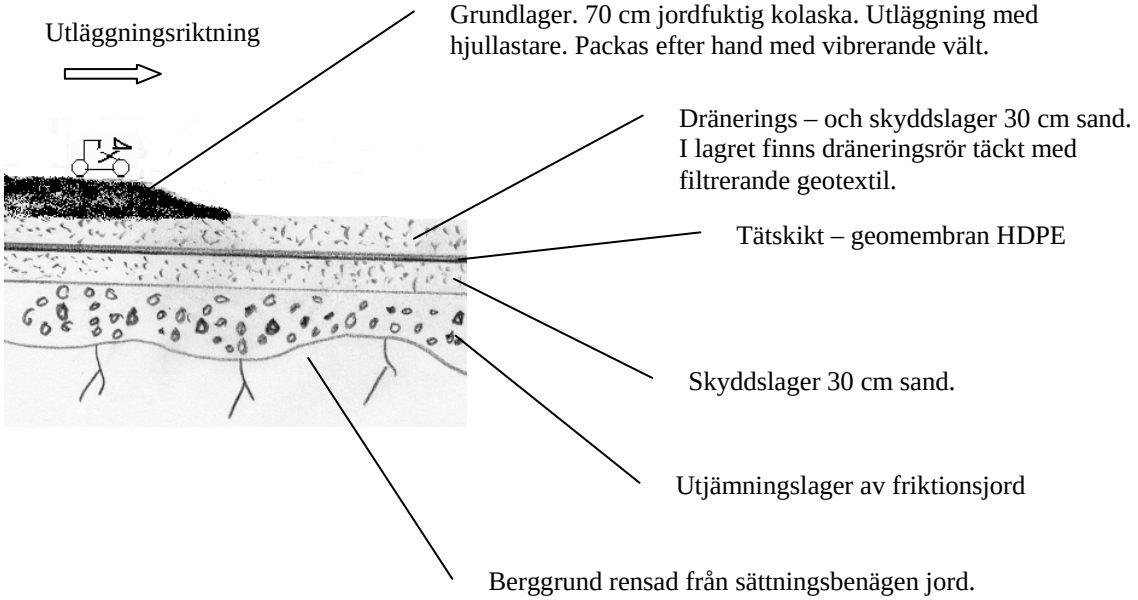
Område 2 är indelat i sex olika delområden, se karta bilaga 2. För närvarande fylls delområde 2. Nästa delområde som skall fyllas är antingen delområde 3 eller 4. En kort beskrivning av dessa områden återfinns i tabell 1. Här har en bottentätning innehållande bentonitmattor diskuterats. I delområde 2 används geomembran av HDPE. Inför påbörjandet av arbetet med det nya delområdet kommer lakvattenmagasinet att flyttas. I bilaga 3 återfinns kartor över hur avskärande diken och lakvattendräner planeras anläggas inom delområde 3 och 4.

Tabell 1. Grundfakta för delområde 3 och 4.

Delområde nr.	Yta (ha)	Fyllnadsdjup (m)	Deponivolym (m^3)
3	3,5	14	490 000
4	1,4	17	238 000

Bottentätning

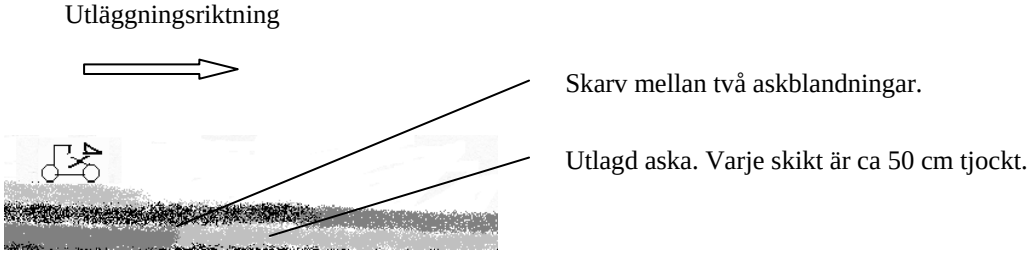
Den bottentätningskonstruktion som används inom område 2 finns översiktligt beskriven i figur 1.



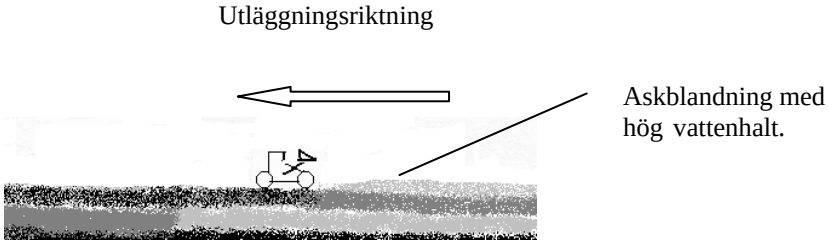
Figur 1. *Principiell uppbyggnad av bottentätning inom Område 2, Högbytorp.*

Utläggning av avfall

De olika askblandningar som tillreds har olika vattenhalt. Jordfuktiga askblandningar läggs ut med hjälp av hjullastare. Hjullastaren väger olastad 21 ton och ca 27 ton lastad. Efter utläggning packas den utlagda askan med en 7 tons vibrerande vält. Det utlagda lagrets tjocklek är ca 50 cm. Mellan lager som är utlagda under olika arbetsdagar uppstår en skarv. Utläggningen planeras så att skarvarna förskjuts i sidled. Detta för att minska risken för djupa vertikala sprickor. I figur 2 beskrivs schematiskt utläggning av jordfuktig aska.
Askblandningar med hög vattenhalt läggs ut med hjullastare men i tunnare skikt jämfört med jordfuktiga blandningar. I figur 3 återfinns en enkel beskrivning hur blöta askblandningar läggs ut.



Figur 2. *Utläggning av jordfuktiga askblandningar. Den utlagda askblandningen är körbar direkt efter utläggning. Utläggning sker satsvis. Skarven mellan olika askblandningar förskjuts i sidled för att undvika djupa sprickor. Efter utläggning kompakteras askan med vibrerande vält.*



Figur 3. *Utläggning av askblandning med hög vattenhalt. Vissa askblandningar kräver hög vattenhalt för att härda bra. Askblandningar med hög vattenhalt är ej "körbara" innan de har härdat. Efter utläggning sker ingen ytterligare kompaktering.*

Temperatur

Askor som är varma när de levereras får svalna utomhus i anslutning till askprepareringsanläggningen innan de blandas. Temperaturen på färdigpreparerad askblandning är i regel 30-40 °C.

Lakvatten

Ytvatten från deponin och närliggande ytor samlas upp tillsammans med lakvatten i en damm nedströms deponin. Uppsamlat lakvatten lagras i dammen mellan bränslesäsongerna. Från lakvattendammen pumpas lakvatten till en vattenreservoar i anslutning till prepareringsanläggningen. Vattnet i dammen provtas 2 gånger per år. I tabell 2 finns en sammanställning över lakvattensammansättningen baserad på mätningar åren 1991-1999.

Tabell 2. Lakvattensammansättning. Sammanställning av 18 prov tagna under perioden 1991-1999.

Parameter	Enhet	Medel	Median	Min	Max
pH	(-log {H^+})	7,59	7,70	6,30	8,10
Konduktivitet	(mS/m)	433,10	444,00	79,80	917,00
Alkalinitet	(mg/l)	103,67	95,50	36,00	235,00
Suspenderat material	(mg/l)	15,78	8,00	2,00	99,00
COD	(mg/l)	183,69	55,00	8,40	2300,00
Cl	(mg/l)	654,50	460,00	42,00	2200,00
SO4	(mg/l)	1182,22	1300,00	180,00	2200,00
Cd	(µg/l)	0,13	0,12	0,02	0,40
Cr	(µg/l)	3,35	2,85	0,20	8,80
Cu	(µg/l)	4,63	3,08	0,20	12,00
Hg	(µg/l)	0,11	0,10	0,02	0,82
Ni	(µg/l)	3,98	2,00	0,50	20,40
Pb	(µg/l)	2,43	1,05	0,20	8,60
Zn	(µg/l)	352,22	37,00	6,00	5100,00
As	(µg/l)	3,26	2,00	1,00	6,00

Avfallskarakterisering

Densitet och tryckhållfasthet

Vid fullskaleförsök med stabilisering av kolaska (ca 75 vikts-%) och aska från sopförbränning (25 vikts-%) uttogs 30 borrprov ur den stabiliserade askan. Proven uttogs efter 6, 21 och 24 veckor från det att avfallet lagts in i deponin. Provkropparnas densitet och tryckhållfasthet bestämdes. I tabell 3, redovisas en sammanfattning av erhållna resultat. Uppmätt hållfasthet och densitet för ren kolaska redovisas i tabell 4.

Tabell 3. Sammanställning av uppmätt densitet och tryckhållfasthet för provkroppar utborrade vid fullskaleförsök med deponering av stabiliserad kol- och sopförbränningsaska. Sammanställningen baseras på totalt 30 prov.

Askålder (veckor)	6	21-24	6	21-24
Egenskap	Densitet (kg/m3)	Densitet (kg/m3)	Hållfasthet (MPa)	Hållfasthet (MPa)
Medelvärde	1856,96	1851,75	9,78	15,65
Median	1858,50	1853,00	9,70	15,90
Min	1706,00	1617,00	4,90	9,20
Max	1957,00	1954,00	15,90	22,70

Tabell 4. Sammanställning av uppmätt densitet och tryckhållfasthet för stabiliserad kolaska.

Typ av försök	Densitet (kg/m3)	Tryck-hållfasthet (MPa)
Borrprov, fullskaleförsök 6 veckor	Ej mätt	12,8
Borrprov, fullskaleförsök 24 veckor	Ej mätt	24,6
Provkub med sida 150 mm, lagrad i 100% RH under 56 dygn	2048	41,5
Provkub med sida 150 mm, lagrad i 100% RH under 91 dygn	2054	49,1
Provkub med sida 150 mm, lagrad i 100% RH under 183 dygn	2053	59,7
Provkub med sida 150 mm, lagrad i 100% RH under 368 dygn	2068	64,2
Provkub med sida 150 mm, lagrad i 100% RH under 730 dygn	2070	66,5
Provkub med sida 150 mm, lagrad vid 100% RH i 1332 dygn	2074	71,6
Provkub med sida 150 mm, lagrad i 50% RH under 56 dygn	1978	49,2
Provkub med sida 150 mm, lagrad i 50% RH under 91 dygn	1953	56,7
Provkub med sida 150 mm, lagrad i 50% RH under 183 dygn	1927	62,4
Provkub med sida 150 mm, lagrad i 50% RH under 368 dygn	1901	56,5
Provkub med sida 150 mm, lagrad i 50% RH under 730 dygn	1904	57,9
Provkub med sida 150 mm, lagrad vid 50% RH i 1332 dygn	1865	48,5
Laboratorieprov tillverkat med ICT-apparat[1], lagring vid 100% RH under 41 dygn	1990	41,5
Laboratorieprov tillverkat med ICT-apparat, lagring vid 100% RH under 41 dygn	1987	42,5
Laboratorieprov tillverkat med ICT-apparat, lagring vid 100% RH under 41 dygn	1994	41,2

Hydraulisk konduktivitet

Uppmätt hydraulisk konduktivitet för olika stabiliserade askblandningar redovisas i tabell 5.

Tabell 5. Uppmätt permeabilitet hos stabiliserad aska.

Typ av prov	**Densitet (kg/m^3)**	**Hydraulisk konduktivitet (m/s)**
Borrprov, fullskaleförsök, kolaska+sopförbränningsaska	1857	$8{,}5 \times 10^{-10}$
Borrprov, fullskaleförsök, kolaska+sopförbränningsaska	1720	$4{,}5 \times 10^{-10}$
Laboratorieprov tillverkat i ICT-apparat, enbart kolaska	ca 2000	$5{,}6 \times 10^{-10}$
Laboratorieprov tillverkat i ICT-apparat, kolaska + sopförbränningsaska	ca 1800	$1{,}2 \times 10^{-9}$

[1] ICT = Intensive Compaction Tester. Apparat för mätning av kompakterbarhet. I en ICT-apparat kompakteras ett prov om ca 1700-1800 g i en komprimeringscylinder med diametern 100 mm. Ett statiskt tryck appliceras på cylinderns rörliga ändplan med en pneumatiskt styrd kolv, varefter cylindern försätts i en skjuvande rörelse under statiskt tryck. Under komprimeringen mäts den minskande höjden hos provet kontinuerligt varvid den ökande densiteten hos provet kan bestämmas.

Porpressvatten

Vid fullskaleförsök med stabilisering av kolaska (75 vikts-%) och aska från sopförbränning (25 vikts-%) uttogs borrprov ur den stabiliserade askan. En liten del (ca 30 g) från två borrprov krossades och placerades i en stålcylinder med höjden 85 mm och diametern 30 mm. Provet belastades med ett tryck motsvarande 238 MPa. Det vatten som då pressades ut ur provet samlades upp och analyserades. Mängden vatten som kunde pressas ut var mindre än vad som krävdes för analys (60 ml) varför proven späddes innan de skickades för analys. I tabell 6 redovisas uppmätta halter (korrigerade för spädning). I tabellen redovisas även motsvarande halt för stabiliserad ren kolaska.

Tabell 6. Uppmätta halter i porvatten utpressat ur stabiliserad aska.

Ämne	Enhet	Högsta uppmätta halt i porpressvatten från stabilserad kolaska + RGP	Uppmätta halter i porpressvatten från stabiliserad kolaska
Ca	mg/l	38368	384
Fe	mg/l	14,79	<0,338
K	mg/l	37897,8	5420
Mg	mg/l	8,02	<2,70
Na	mg/l	34511,4	2930
S	mg/l	707,52	4270
Al	ug/l	1911,36	605
As	ug/l	464,64	30,7
Ba	ug/l	14491,8	164
Cd	ug/l	212,96	7,47
Co	ug/l	219,12	<6,14
Cr	ug/l	322,70	246
Cu	ug/l l	1320	99,9
Hg	ug/l	299,30	<18,4
Mn	ug/l l	126,72	27,7
Ni	ug/l	3964,08	253
Pb	ug/l l	284,77	<18,4
Zn	ug/l	334,4	<123
Cl	mg/l	151360	614

Utlakningsförlopp

Utlakningsförloppet hos aska som har stabiliserats i askprepareringsanläggningen har mätts med laktest. Det laktest som använts är det s.k. ULP-testet (Uniform Leaching Procedure). Testet innebär i korthet att en provkropp i form av en cylinder med diametern 50 mm och höjden 25 mm borras ut ur materialet som skall testas. Cylindern får därefter ligga i avjoniserat vatten under bestämda tidsintervall. Efter varje tidsintervall analyseras lakvattnet och cylindern placeras i nytt vatten. Lakvätskan som används är avjoniserat vatten med ledningsförmåga mindre än 0,01mS/m och ett pH mellan 4 och 5. Mängden lakvätska, mätt i cm^3, som används i varje lakcykel är tio gånger större än provkroppens yta mätt i cm^2. I bilaga 4 redovisas resultatet av fyra ULP-test.

Framtida användning av bentonitmattor som bottentätning inom Område 2

Hittills har geomembran av HDPE använts som bottentätning inom Område 2. Skälet till att HDPE hittills har använts i stället för bentonitmattor är framförallt två:

1. Det har funnits misstankar om att salthalten i det lakvatten som uppstår inom Område 2 kan påverka en bentonittätning på ett olämpligt sätt.
2. Geomembran av HDPE är billigare.

Nedan diskuteras ett antal aspekter på att använda bentonitmattor som bottentätning inom Område 2, Högbytorp.

Salter

Enligt litteraturuppgifter (se kapitel 5.7.3) finns det risk för att permeabiliteten hos bentonitmattor kan öka med upp till 20 gånger om halten av natriumklorid uppgår till 400 mg/l i det vatten som mattorna utsätts för. Kloridhalten mäts regelbundet i lakvatten från Område 2. Medelvärdet för kloridhalten i lakvatten från Område 2 är ca 650 mg/l. Det högsta uppmätta värdet är ca 2200 mg/l.

Natriumhalten mäts inte normalt i lakvatten från Område 2, men i samband med utlakningsförsök s.k. ULP-test på provkroppar av stabiliserad aska mättes såväl klorid- som natriumhalt (se bilaga 4). Kvoten halt av natrium och klorid varierade då från ca 0,2 till 0,3. Om man antar att en kvot av 0,25 mellan natrium och klorid kan anses representativ för lakvattnet innebär det att halten natriumklorid i medel är ca 400 mg/l och som mest omkring ca 5600 mg/l.

Halten av kalcium-, magnesium- och järnjoner bör bestämmas för det fall att konduktiviteten överstiger 100 mS/cm (=10 000 mS/m), se kapitel 5.7.3. Om den sammanlagda halten av tvåvärda joner överstiger 10 milliekvivalenter bör halterna begränsas. Halten av kalium bör begränsas om halterna uppgår till ca 10 milliekvivalenter då det annars finns risk för att natrium i montmoreolitmineralet ersätts av kalium – med ökad genomsläpplighet som följd.

Konduktiviteten i lakvattnet från Område 2 är ca 600 mS/m. Halten av kalcium, magnesium, järn samt kalium mäts inte kontinuerligt. I de utlakningsförsök som genomförts på stabiliserad aska (se bilaga 4) var de dominerande katjonerna i lakvattnet (i fallande ordning): kalcium, kalium, natrium, aluminium, magnesium, barium, järn samt zink.

Laddningsbalansen för de ämnen som mäts regelebundet i lakvattnet från Område 2 (se tabell 2) visar ett underskott på positiv laddning om i genomsnitt drygt 40 milliekvivalenter per liter. Om man antar att lakvattensammansättningen inte nämnvärt avviker den som uppmättes vid utlakningsförsök förefaller det troligt att kalcium och kalium är de dominerande katjonerna i lakvattnet och att halten är i närheten av 10 milliekvivalenter per liter.

Tungmetaller

Enligt litteraturuppgifter (se kapitel 5.7.3) förefaller vatten med upp till 3 milliekvivalenter per liter tungmetaller ringa påverkan på bentonit förutsatt att halten av övriga två och trevärda joner är låg. Medelhalten av tungmetaller i lakvatten från Område 2 framgår av tabell 2. Omräknat motsvarar medelhalten av tungmetaller ca 0,01 milliekvivalenter per liter.

Svälltryck och densitet – praktiska konsekvenser

I föreliggande rapport kapitel 3 diskuteras betydelsen av bentonittätningens densitet och svälltryck. Vid en praktisk användning där bentonitmattor används som bottentätning kommer bentonitens svälltryck och densitet att variera över tiden. I början kommer svälltrycket och densiteten att vara låg till följd av att mängden avfall som överlagrar bottentätningen är liten. I takt med att mer avfall tillförs deponin så kommer svälltrycket och densitet att öka. Då densiteten är hög och svälltrycket högt är risken mindre för att bentonitens tätande funktion skall upphöra på grund av reaktioner med ämnen i lakvatten. Tills dess att erforderligt svälltryck och densitet erhållits är bentonittätningen är extra känslig för påverkan av ämnen i lakvattnet.

Den kritiska densitetsgränsen är ca 1600 kg/m^3 (se kapitel 3.3.2), vid denna densitet är lerstrukturen inte stabil i närvaro av kalcium och andra tvåvärda joner. Flertalet av de Bentonitmattor som marknadsförs i Sverige innehåller natriumbentonit (se kapitel 5). Svällningstrycket för natriumbentonit vid densiteten 1600 kg/m^3 är ca 300 kPa. Den stabiliserade askans densitet är ca 1800 kg/m^3, vilket innebär att det krävs ca 17 meters fyllnadsdjup för att uppnå ett svälltryck av 300 kPa. Det krävs synnerligen god planering och riklig tillgång på askor för att på kort tid uppnå 17 meters fyllnadsdjup.

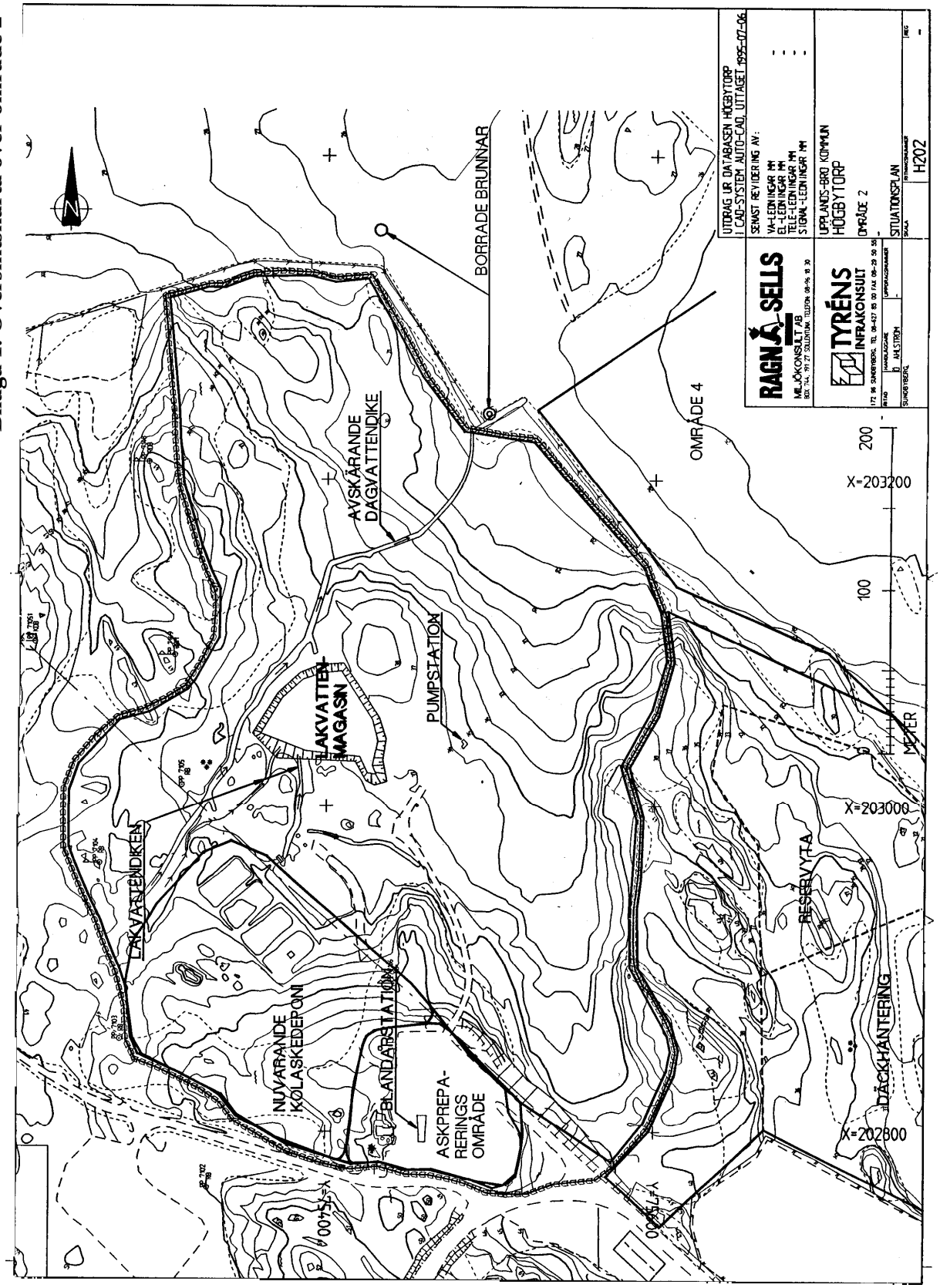
I kapitel 5.7.3 anges att bentonitmattan bör förbelastas med en meter täckjord innan mattan befuktas. De massor som används för förbelastning måste rimligen vara helt rena eftersom befuktningen av bentonitmattan skall ske med *rent vatten efter* det mattan förbelastats. Eftersom bentonitmattan bör förbelastas med en meter ren jord så uppnår man ingen vinst av deponivolym jämfört med en konventionell lertätning.

Vidare måste det anses tveksamt om en meter täckjord ger tillräckligt svällningstryck i detta fall eftersom halten av kalcium i lakvattnet är hög. En meter täckjord ger ett svällningstryck om ca 20 kPa, vilket resulterar i en densitet hos natrumbentonit om mindre än 1400 kg/m^3. Vid denna låga densitet är bentoniten mycket känslig för kalciumjoner.

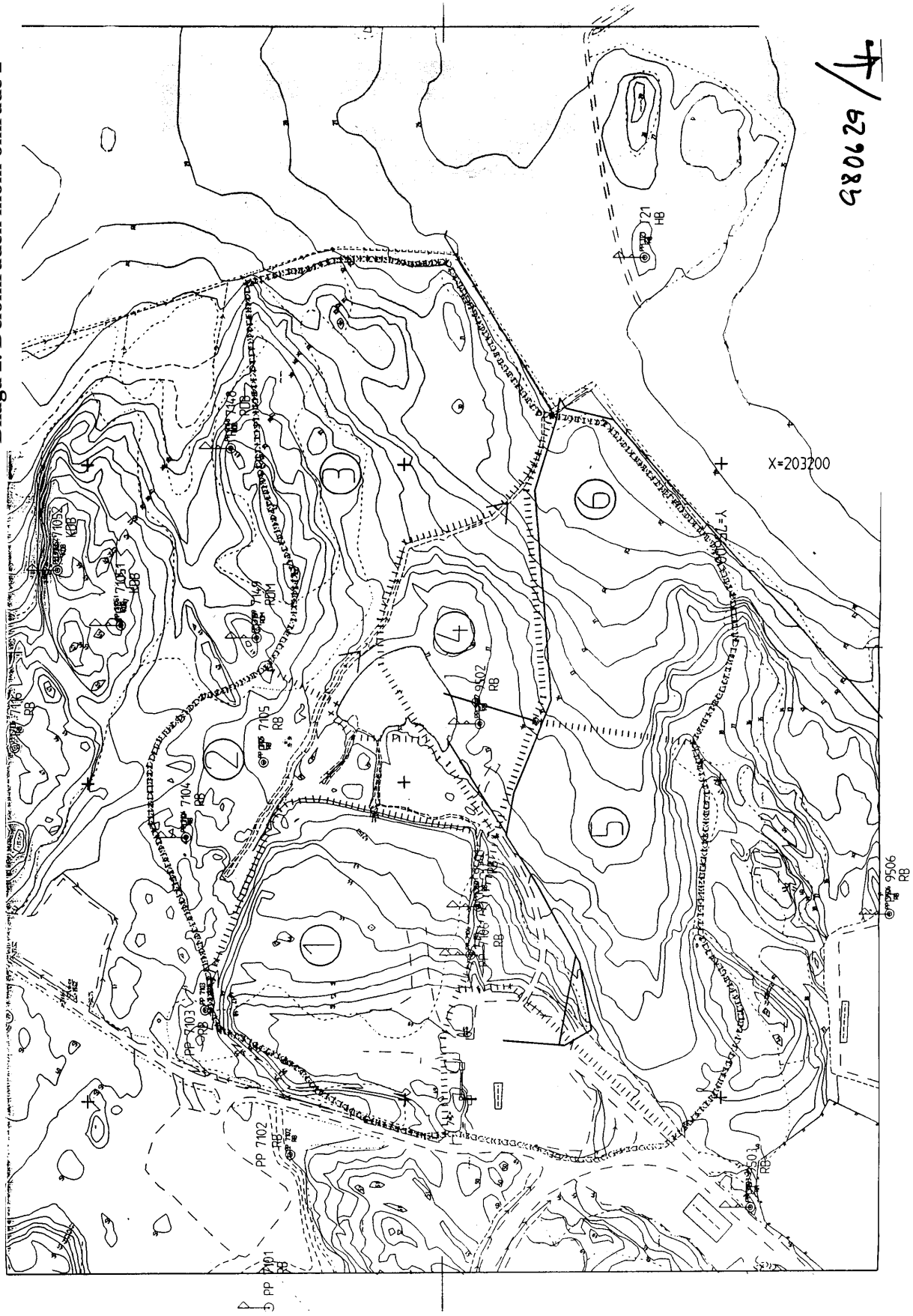
Slutsatser

Misstankarna om att lakvattnet från Område 2 kan påverka ett tätskikt av bentonit var befogad. Med dagens kunskap om bentonitmattor och dess egenskaper så finns det inga uppenbara fördelar med att använda bentonitmattor som bottentätning jämfört dagens metod, snarare nackdelar.

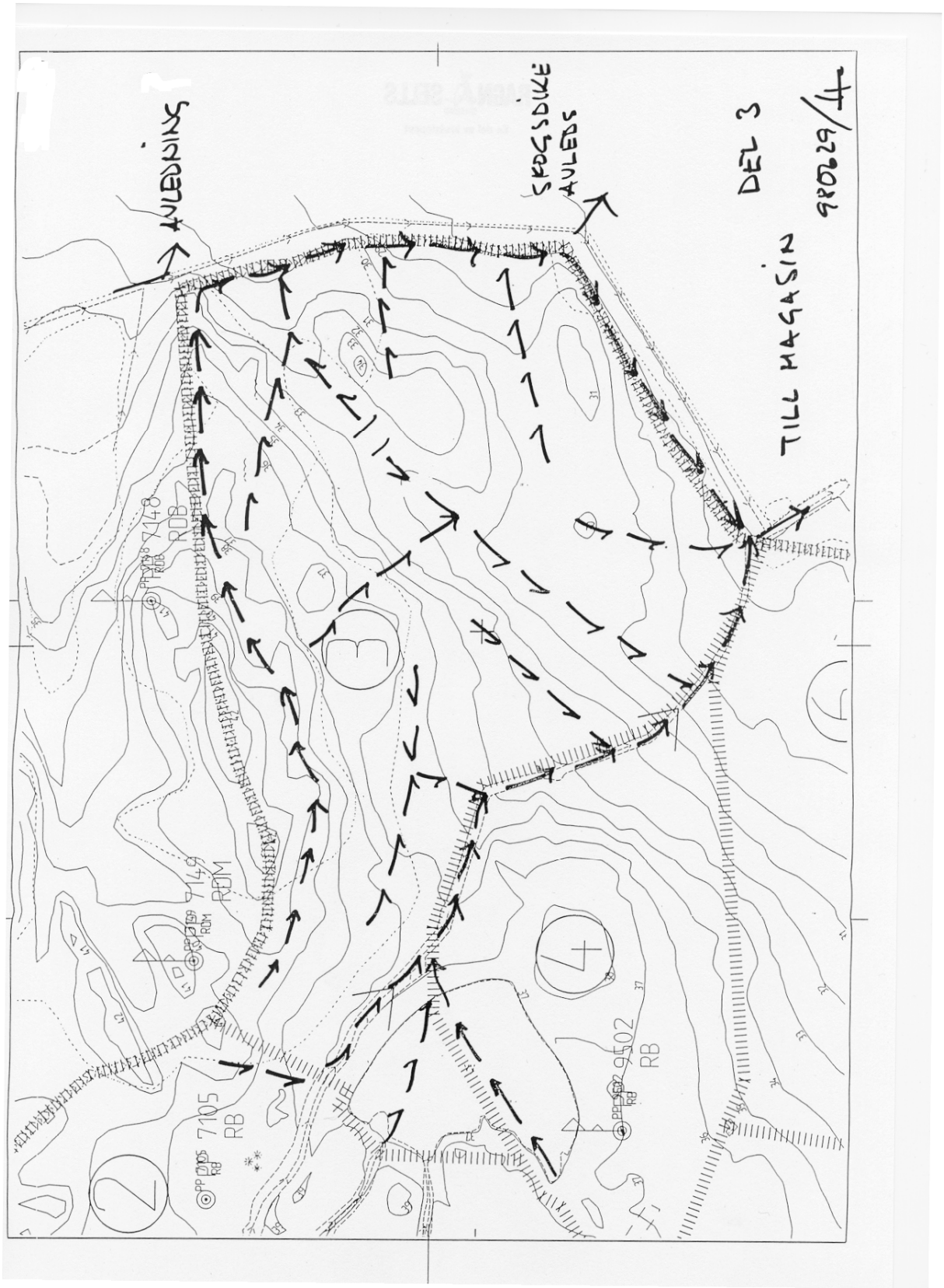
Bilaga 1. Översiktskarta över område 2



Bilaga 2. Delområden inom område 2

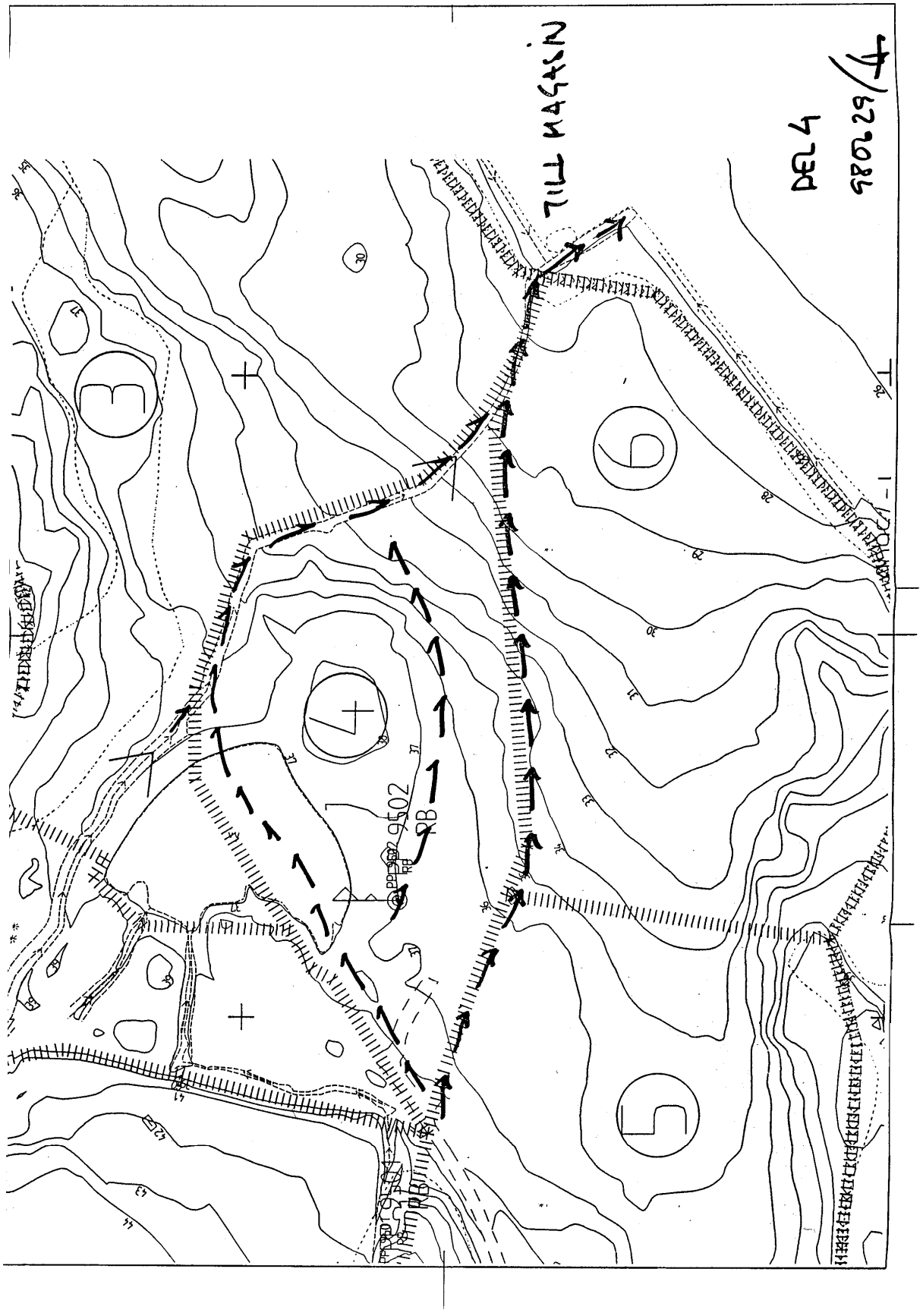


Planerat system för uppsamling av lakvatten för delområde 3.

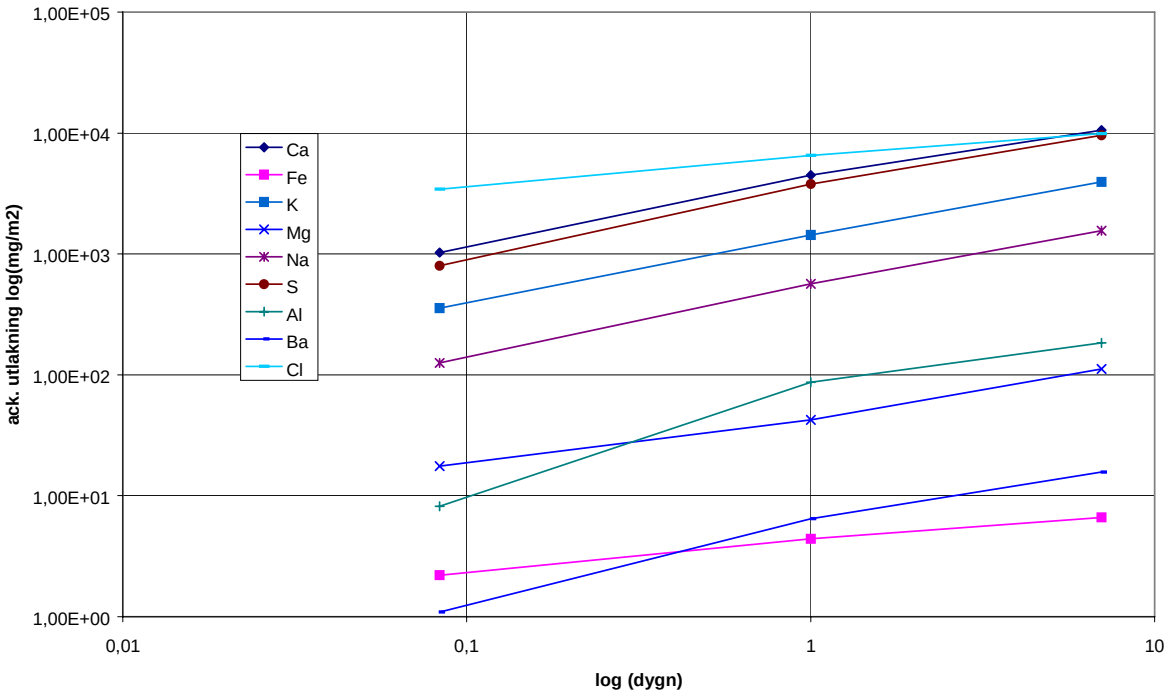


Bilaga A3a. Planerat system för uppsamling av lakvatten för delområde 3.

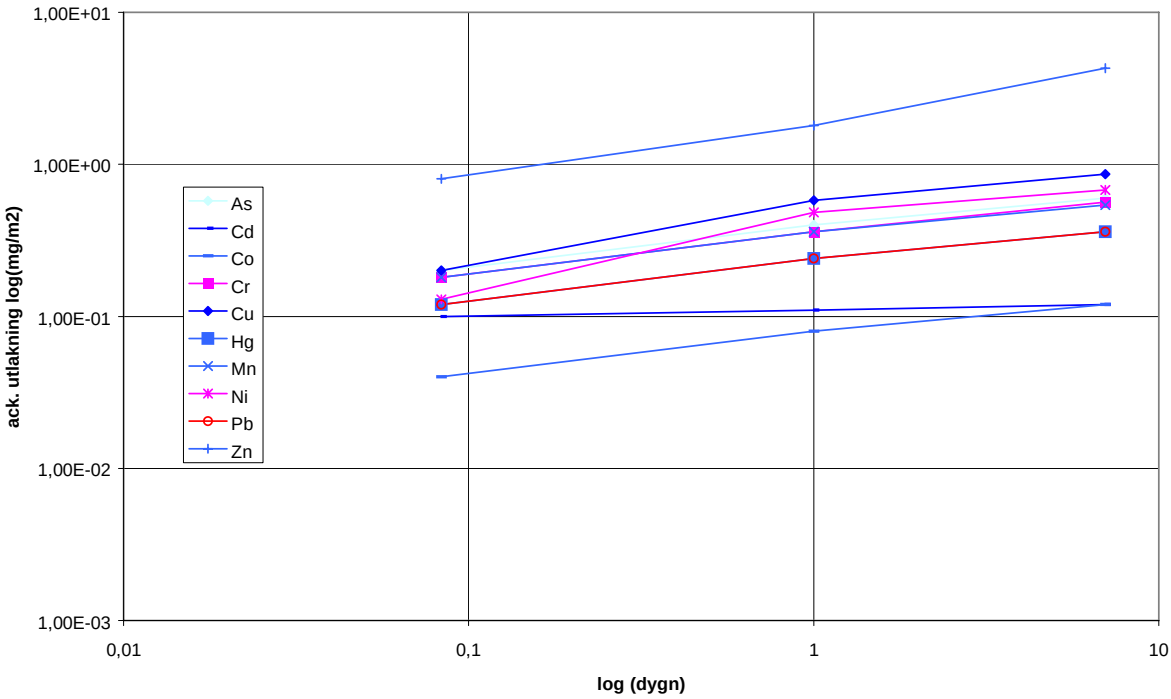
Planerat system för uppsamling av lakvatten för delområde 4.



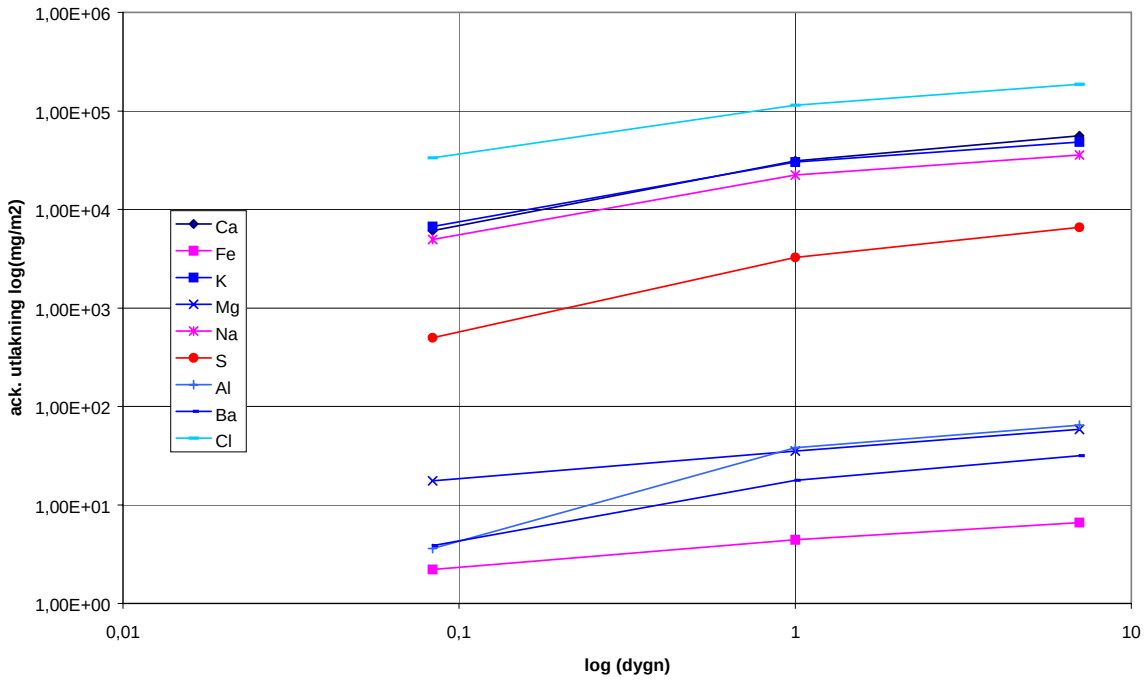
Bilaga A3b. Planerat system för uppsamling av lakvatten för delområde 4.



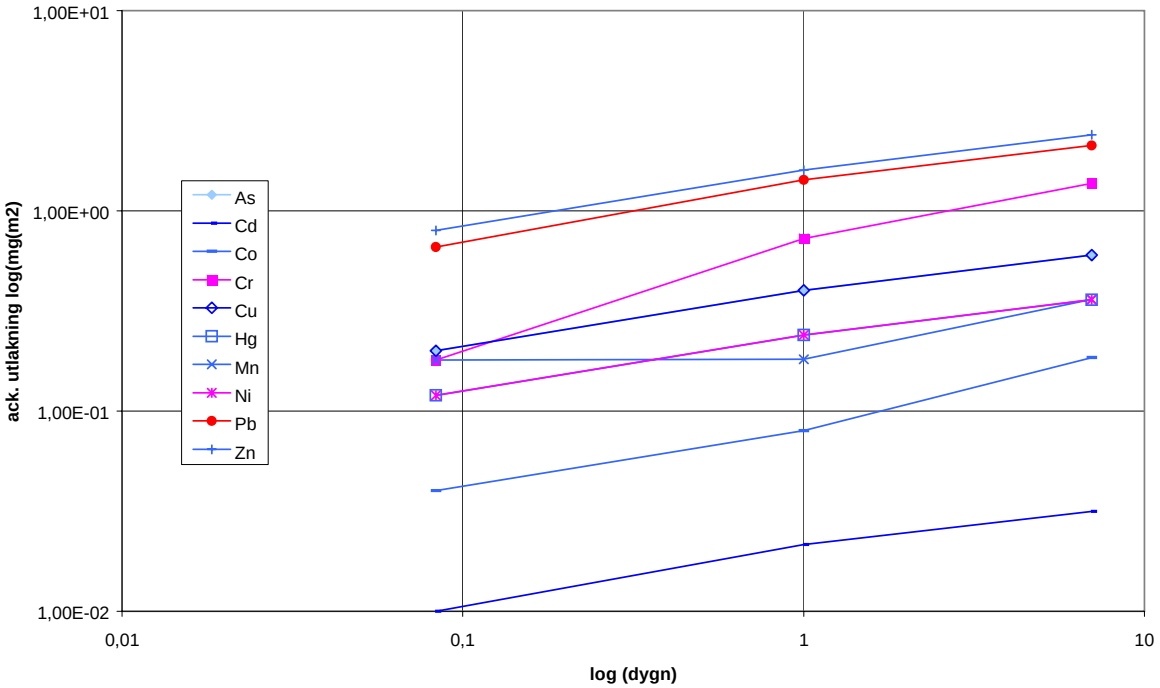
Figur 1. *Uppmätt utlakning vid ULP-test på provkropp av kolaska. Provkroppen är framställd i laboratorieskala.*



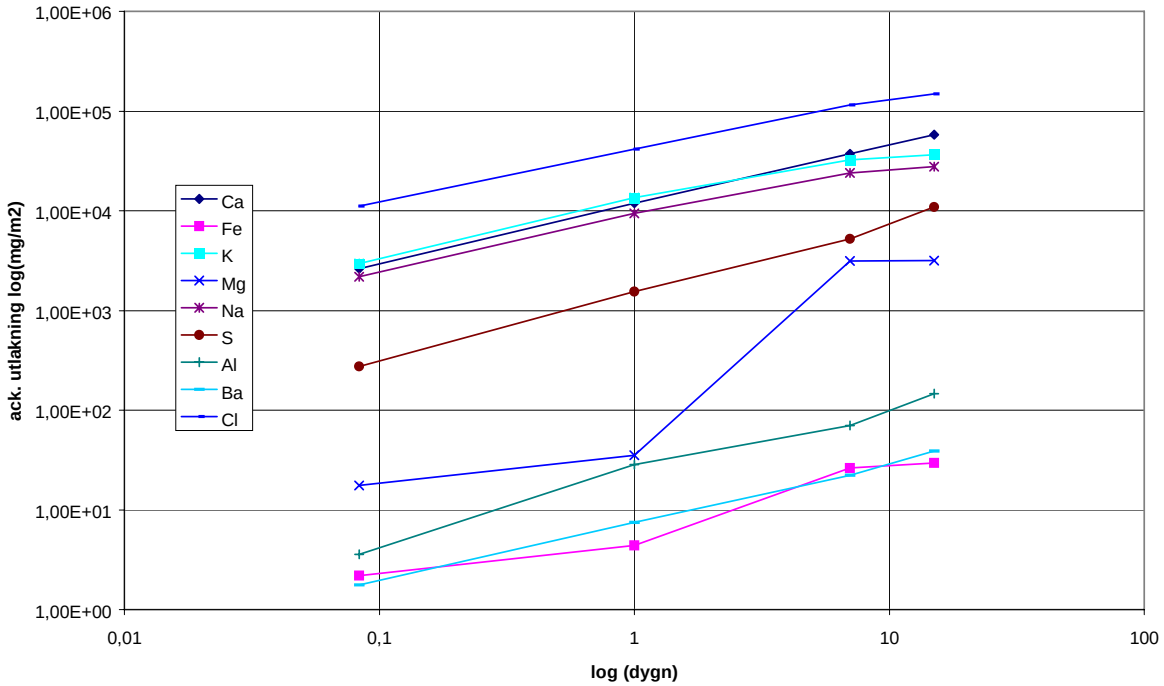
Figur 2. *Uppmätt utlakning vid ULP-test på provkropp av kolaska. Provkroppen är framställd i laboratorieskala.*



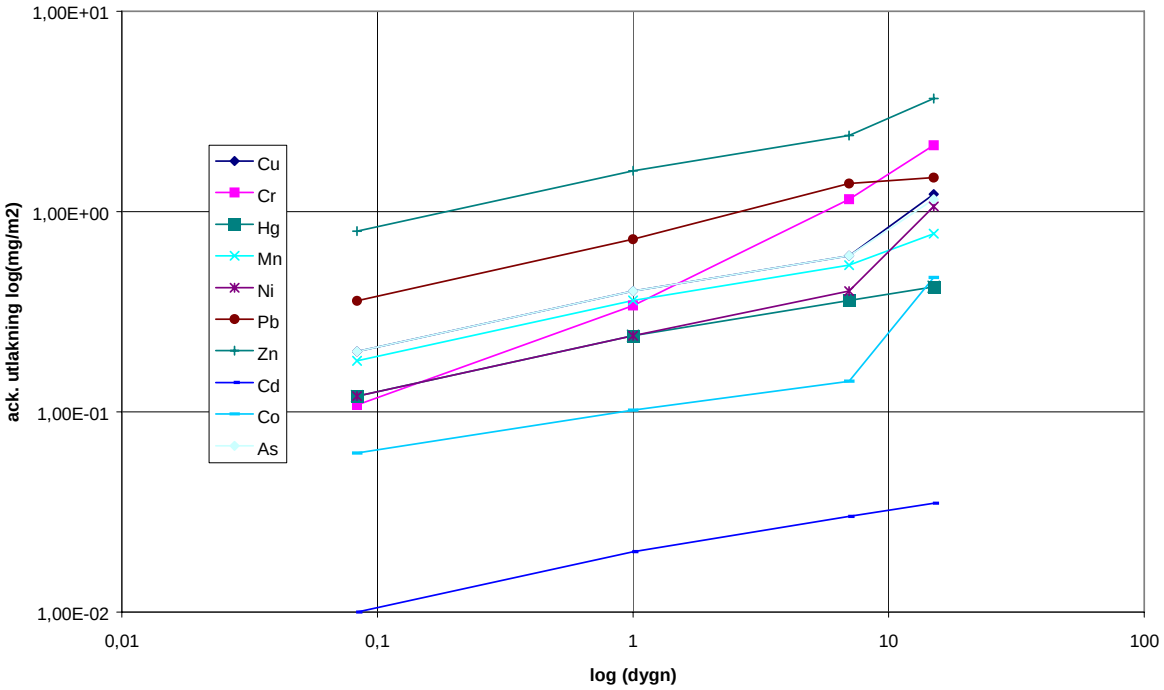
Figur 3. *Uppmätt utlakning vid ULP-test på provkropp av kolaska (75 vikts-%) och aska från avfallsförbränning (25 vikts-%). Provkroppen är framställd i laboratorieskala.*



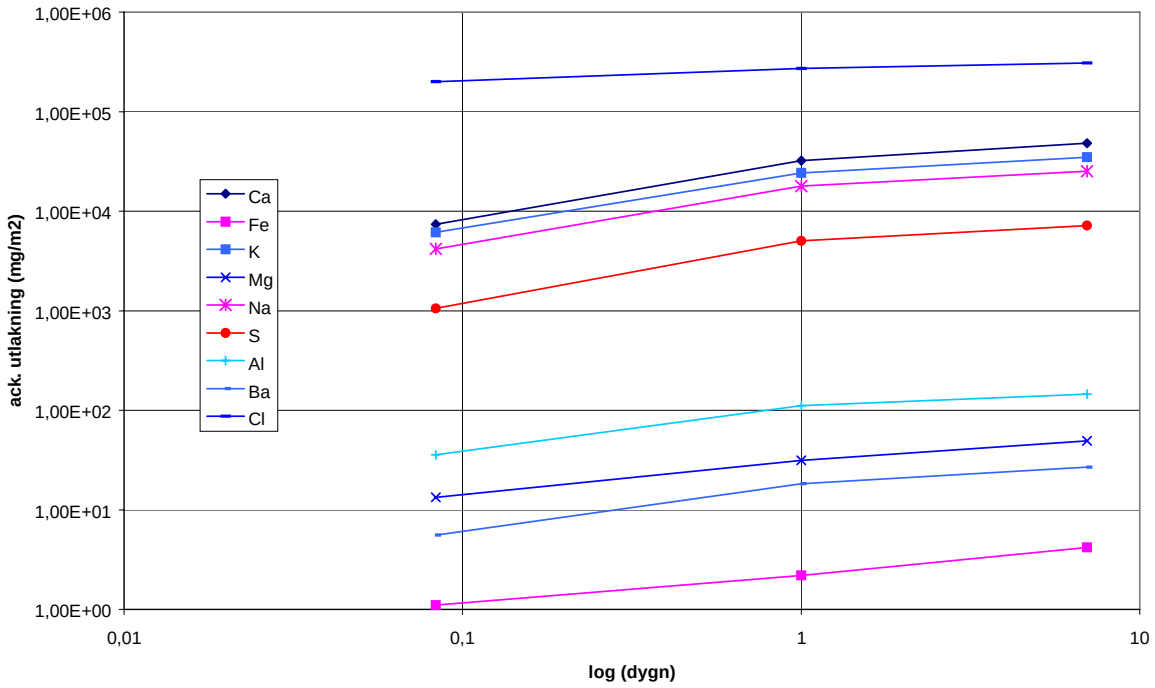
Figur 4. *Uppmätt utlakning vid ULP-test på provkropp av kolaska (75 vikts-%) och aska från avfallsförbränning (25 vikts-%). Provkroppen är framställd i laboratorieskala.*



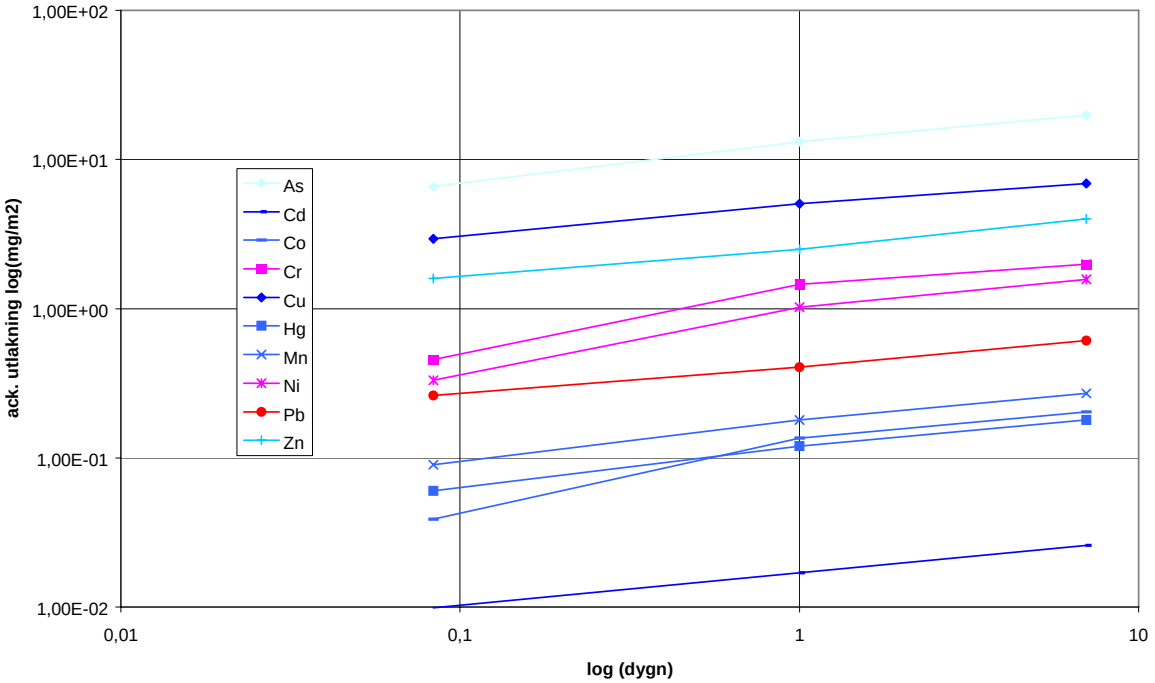
Figur 5. *Uppmätt utlakning vid ULP-test på provkropp av kolaska (75 vikts-%) och aska från avfallsförbränning (25 vikts-%). Provkroppen är utborrad ur en provdeponi vid fullskaleförsök. Askan lades in i deponin i jordfuktigt tillstånd och packades med välter.*



Figur 6. Uppmätt utlakning vid ULP-test på provkropp av kolaska (75 vikts-%) och aska från avfallsförbränning (25 vikts-%). *Provkroppen är utborrad ur en provdeponi vid fullskaleförsök. Askan lades in i deponin i jordfuktigt tillstånd och packades med välter.*



Figur 7. Uppmätt utlakning vid ULP-test på provkropp av kolaska (75 vikts-%) och aska från avfallsförbränning (25 vikts-%). *Provkroppen är utborrad ur en provdeponi vid fullskaleförsök. Askan lades in i deponin i plastiskt (gjutbart) tillstånd. Efter utläggning genomfördes ingen vibrering eller annan bearbetning av massan.*



Figur 8. Uppmätt utlakning vid ULP-test på provkropp av kolaska (75 vikts-%) och aska från avfallsförbränning (25 vikts-%). *Provkroppen är utborrad ur en provdeponi vid fullskaleförsök. Askan lades in i deponin i plastiskt (gjutbart) tillstånd. Efter utläggning genomfördes ingen vibrering eller annan bearbetning av massan.*

FALLSTUDIE LÖT

Herman Brundin

SÖRAB

Projektplan

Projekt: **BENTONITTÄTNING TESTYTA BERGTÄKT**

Bakgrund: På LÖT AVFALLSANLÄGGNING skall behandling av avfall och uppläggning av avfall göras inom yta där uttag av berg skett. I enlighet med SÖRABs miljöpolicy och miljömål skall miljöpåverkan p.g.a. verksamheten minimeras och utveckling av upplagsteknik bedrivas. Inom ytor där berg tagits ut skall bottentätning göras innan avfallshantering bedrivs.

Syfte: Projektets syfte är att testa bottentätning med bentonitinblandning i filler i bergskärning.

Testyta: Inom Löt finns en bergtäkt från första utbyggnaden (yta 8 på bil 1) 1994. Utsortering av slaggrus samt annan återvinningsverksamhet avses förläggas till denna yta. Yta är ca 6500 kvm.

Tillstånd: Koncessionsbeslut avfallshantering dat 1992-06-06.
Länsstyrelsetillstånd bergtäkt dat 1994-02-10.

Villkor: Nr 1: Verksamheten ska bedrivas i huvudsaklig överensstämmelse med koncessionsansökan. Se teknisk beskrivning tillhörande ansökan dat 1990-12-14, punkt 6.3.4 slaggsortering och 6.4.4 slaggupplag.
Nr 2: Bullerbegränsning till max 50 dB(A) 0700-1800, 45 dB(A) 1800-2200 och 40 dB(A) 2200-0700.
Nr 4: inom alla deponiytor skall bottentätning ske uppfyllande krav på en permeabilitet mindre än $10*1^{-10}$.
Nr 7: Täckningskrav mot oxidation av våt rökgasreningsprodukt.
Koncessionsnämnden har överlåtit åt tillsynsmyndigheten att föreskriva villkor för ;
b) val av täckningsmetod innan slutlig täckning sker
c) återvinning av grus och skrot ur slagg från avfallsförbränning
f) spridning av stoft från behandling och damm från upplagsytor och vägar (generellt) för hantering.
Nr 11: planer skall inges till länsstyrelsen för verksamhet på olika delar.

Tidplan: Hantering av slagg skall kunna ske under hösten år 2000.
Tillståndshantering länsstyrelsen samråd 2000-03-15- 2000-05-15?
Testyta skall anläggas före 2000-07-01.

Miljöaspekter: Under anläggandet av testyta uppstår buller från entreprenadmaskiner och blandare.
Tillvaratagande av överskottsmaterial från tillverkning av krossprodukter.

Teknik: Undergrunden justeras i lutning mot uppsamlingsbrunn. Blandningsstation blandar bentonit i lämplig proportion i filler från bergkross inom anläggningen. Tätskikt täcks med skyddslager och ytbeläggning.

Arbets-
beskrivning; Under upprättande hos konsult.

Organisation:	Projektledning:	SÖRAB
	Tillstånd/miljöskydd:	SÖRAB
	Arbetsbeskrivning:	konsult
	Entreprenadarbeten:	entreprenör/samarbetspartner
	Rapportering:	SÖRAB/ÅF

Beslutsordning: I budgetprojektlista antagen 1999-10-20 -som utredning (100 tkr)
Länsstyrelsen 1999-12-03, informellt tidigt samråd AB-HB
Ledningsgruppen med tilldelning av projektnr 1999-12-15
Länsstyrelsen 2 mån handläggning, villkor
Ledningsgruppen före igångsättning av verksamhet

Ekonomi: avsatt i gemensamt projekt: "långtidsegenskaper bentonit": 65.000 kr arbeten SÖRAB + 15.000Kr till gemensam rapport.
Entreprenadarbeten ca; 950.000 kr samfinansiering med annan part diskuteras.

Bilaga C

FALLSTUDIE TVETA

Gustav Tham

Telge Återvinning AB

Telge Återvinning AB
Tveta Avfallsanläggning
Södertälje

Projektplan för yt- och sluttäckning av Tveta Avfallsupplag

Bakgrund

På Tveta Avfallsanläggning skall stora delar av askupplag, förorenade jordar och hushållsupplag sluttäckas under kommande år.

Koncessionsnämnden har redan beslutat att den del av upplaget som kommer att omfatta deponi av förorenad jord kring ett nedlagt sågverk i Södertälje skall sluttäckas dels med stabiliserad aska del med bentonitmatta. Volymen omfattar ca 28 000 m3.

Beträffande sluttäckning av ask- och hushållsupplaget vill bolaget även testa långsiktig utlakning av restprodukter genom att använda befintliga askor från energiutvinning från värmeverk för att utnyttja detta material i form av någon sluttäckning som kan hålla de krav på vattengenomsläpplighet som myndigheten beslutar. Det handlar då om metodutveckling, där behov av bentonit som komplement kan vara nödvändig

Koncessionsnämnden har redan beslutat att två mindre försöksytor på hushållupplaget får användas till försök med stabiliserad respektive ostabiliserad aska. Resultatet från detta försök skall redovisas under 2000.

Syfte

Projektets syfte är att testa vattengenomsläppligheten och utlakning från områden som omfattas av topptätning med bentonit respektive stabiliserade askor.

Miljökonsekvenser

Stora ytor skall under många år framöver täckas dels på avfallsanläggningar vars verksamhet delvis avslutas på grund av kommande förbud om deponering dels på anläggningar som inte kan fortsätta att bedriva någon verksamhet av miljöskäl eller av ekonomiska orsaker.

I Stockholmsregionen finns stora mängder askor från energiutvinning som borde kunna användas för sluttäckning, som alternativ till deponering. I vissa fall kan dessa askor kombineras med annat material såsom inblandning av bentonit för att öka skyddet mot omgivningen.

Miljöfördelarna är stora att kunna utnyttja sekundärt material i stället för att köpa material från täkter. Även avfallsskatten innebär betydande ekonomiska fördelar när avfall kan utnyttjas som konstruktionsmaterial.

Tillstånd

Nu gällande tillstånd omfattar;

- Täckning av arsenikförorenad jord med bentonitmatta
- Täckning av askupplag med stabiliserad/ostabiliserad aska
- Täckning av två mindre ytor på hushålldeponin (har redan utnyttjats)

Ansökan har också lämnats till Miljödomstolen om att få utvidga de två mindre ytorna på hushållsdeponin till att omfatta 4 ha i lutning (hushållsdeponins östra flank) i syfte att få ett bättre underlag för utvärdering.

Tidplan

Täckning av förorenad jord kan ske så snart Södertälje kommun beslutat att påbörja saneringsarbetet vid det nedlagda sågverket. Projektet har försenats i avvaktan på att få finansiellt stöd. Beräknad start under våren 2001.

Sluttäckning av askupplag med stabiliserad aska/bentonit kan påbörjas under hösten och fortlöpa under ca 6 månader.

Sluttäckning av hushållsdeponin med stabiliserad aska/bentonit kan påbörjas så snart Miljödomstolens dom meddelats (juni 2000).

Arbetsbeskrivning

Den planerade sluttäckningen utreds av konsult för närvarande. Den slutliga utformningen skall ske i samråd med tillsynsmyndigheten.

Ekonomi

Avsatt i gemensamt projekt: ”Långtidsegenskaper tätskikt med bentonit”
Beslut i ledningsgruppen efter upphandling. Total kostnad under 2000/01 ca 1,8 Mkr.

Rapportering

Till projektgruppen. Delrapport våren 2001.

Referens- och kontaktperson

Gustav Tham, 08 553 222 10, mobil 0708 51 58 30

LABORATORIEFÖRSÖK FÖR EXEMPLIFIERING AV BENTONITMATTORS GENOMSLÄPPLIGHET

Lund 00-10-25

Roland Pusch
Geodevelopment AB

1 BAKGRUND

Tillverkare av bentonitmattor redovisar ofta egenskaperna hos sina produkter men sällan med noggrann beskrivning av experimentens utförande. Ofta saknas också angivelse av den viktigaste parametern, densiteten, som enligt rapportens textdel bestäms av överlagringstrycket och inte är någon materialegenskap. För att illustrera hur genomströmningen av en typisk bentonitmatta sker har ödometerförsök.utförts som komplement till den teoretiska utredningen. Vid försöket användes såväl destillerat vatten som 3.5 % kalciumkloridlösning för att belysa betydelsen av perkolatets saltinnehåll.

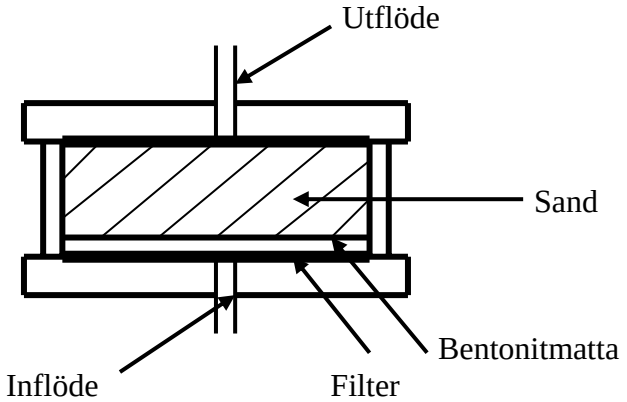
2 MATERIAL

Bentonitmattan var av typ Bentomat sydd med ca 5 mm tjocklek innehållande Na-bentonit av typ Volclay mellan två geotextilier, en vävd och en icke vävd (tillverkare CETCO). Lermaterialet uppges av tillverkaren vara Wyomingbentonit, som har Na som huvudsaklig adsorberad katjon och som har montmorillonit som viktigaste mineralkomponent.

3 EXPERIMENTELLT

3.1 Försöksanordning

För försöken användes en ödometer med 100 mm invändig diameter (Figur 1). .



Figur 1. *Principarrangemang för mätning av genomsläppligheten hos bentonitmatta i kontakt med sand.*

I ödometern anbringades 2 mm tjocka sintrade stålfilter med 50 μm porstorlek och häremellan en väl inpassad lufttorr bentonitmatta och välpackad sand med kornstorleken 0.05 till 2 mm. För att eliminera läckage utmed ödometerväggen fylldes bentonitpulver över mattans kontakt med väggen till 5 mm avstånd från densamma innan sanden fylldes i.

3.2 Provningsförfarande

Bentonitmattan med överliggande sand förbelastades med ett tryck av storleksordningen 200 kPa, varefter ödometern förslöts och in- och utflödesvägarna anslöts till byretter för vattenmättnad från ödometerns undersida och efterföljande genomströmning från samma sida. Destillerat vatten användes för mättnaden, som fick pågå 3 dagar under ett vattentryck av och genomströmning under 1 vecka varefter 3.5 % $CaCl_2$-lösning fylldes i byretterna och anslutande slangar för mätning av genomsläppligheten. Efter mätningarna öppnades ödometern och ett cylindriskt prov av bentonitmattan med anslutande sand skars ut med skalpell för en mikroskopisk undersökning av om lermaterial vandrat ut från mattan till sanden.

3.3 Prediktering

Densitet

Densiteten hos mattans bentonitinnehåll kunde inte bestämmas förrän ödometern demonterats efter försöksseriens slut och den befanns då vara 1500 kg/m^3, vilket svarar mot ett svällningstryck av ca 200 kPa vid vattenmättnad med elektrolytfattigt vatten och ca 10 kPa då porvattnet utgörs av 3.5 % $CaCl_2$-lösning. Eftersom kompakteringstrycket och svällningstrycket är av samma storleksordning har mattan inte undergått vare sig kompression eller expansion då destillerat vatten utgjort porvatten medan en viss kompression kan ha ägt rum vid genomströmningen med kalciumkloridlösning.

Genomsläpplighet

Enligt omfattande tidigare undersökningar av Wyomingbentonit av det aktuella slaget bör den hydrauliska konduktiviteten vid genomströmning med elektrolytfattigt vatten vara ca E-11 m/s medan genomströmning med 3.5 % $CaCl_2$-lösning bör ge ett värde av ca E-8 m/s. Den hydrauliska gradienten var 5-25 vilket är ett rimligt medelvärde på trycksituationen i en topptäckning men 5 till 10 gånger lägre än det maxvärde som kan förväntas.

3.4 Mätvärden

Resultatet av mätningarna av genomsläppligheten sammanfattas i Tabell1.

Tabell 1. *Predikterade och mätta värden på den hydrauliska konduktiviteten K m/s, hos bentonitmattan med en densitet hos lermaterialet av 1500 kg/m^3.*

Predikterat för dest. vatten	**Predikterat för 3.5 % $CaCl_2$**	**Uppmätt för dest. vatten**	**Uppmätt för 3.5 % $CaCl_2$**
E-11	9E-9	2.0E-11	2.1E-10

Mätningarna visar att genomsläppligheten vid perkolering med destillerat vatten är av förväntad storleksordning medan den är nästan 50 gånger lägre än förväntat då perkolatet var 3.5 % $CaCl_2$-lösning. Den viktigaste förklaringen till den sistnämnda avvikelsen är att kompression till högre densitet och därmed lägre genomsläpplighet ägde rum vid saltvattengenomströmningen, men det är också sannolikt att tätningsverkan uppkommit genom att fria aggregat av lerpartiklar skapats vid genomströmning med det salta porvattnet och anrikats i ”utströmsdelen” av lermembranet under inverkan av den relativt höga hydrauliska gradienten.

För att utreda om lermaterial migrerat ut från membranet in i sandfiltret togs prover för mikrostrukturell analys. De skars ut från gränsområdet mellan membran och sand och preparerades genom mättnad med etylalkohol och i ett andra steg med metyl/butylmetakrylat och katalysator. Efter polymerisering framställdes ultratunna snitt för elektronmikroskopisk undersökning. Slutsatsen av denna studie var att praktiskt taget inget lermaterial vandrat ut ur membranet, endast ett mycket litet antal små aggregat kunde skönjas i sandfiltrets porer. De kan ha vandrat ut vid perkoleringen med destillerat vatten och koagulerat där i samband med den efterföljande genomströmningen med saltvatten. Vid användningen av den undersökta typen av bentonitmattor i deponier är innehållet av elektrolyter i det genomströmmande vattnet sannolikt tillräckligt för att hindra effektiv dispergering och förlust av lermaterial men kompletterande laboratorieförsök med extrema men i praktiken möjliga hydrauliska gradienter bör göras för säkerställande av mattornas funktion.

3.4 Slutsatser

En bentonitmatta av den undersökta typen belastad med ett effektivtryck motsvarande överlasten på en topptäckning utsatt för normala hydrauliska gradienter ger ett strömningsmotstånd som svarar mot den teoretiskt förutsagda

vattengenomsläppligheten. Uttransporten av lerpartiklar under inverkan av normala hydrauliska gradienter är mycket marginell men eftersom högre gradienter sannolikt kan uppkomma under vissa situationer i topptäckningar bör komplettering av labstudien göras.

Lund 00-10-25

Roland Pusch
Geodevelopment AB

Bilaga E

SENASTE KUNSKAPSTILLSKOTT

Lund 01-05-12

Roland Pusch
Geodevelopment AB

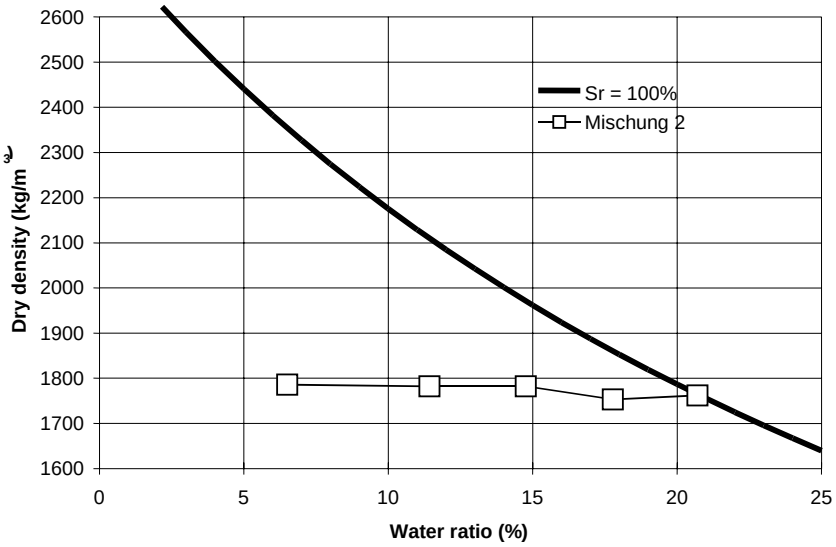
I dagarna pågående forskning kring funktionen och beständigheten hos smektitiska lermaterial för isolering av avfall har blivit alltmer inriktad mot användning av europeiska bentoniter som är tillgängliga kommersiellt till relativt låg kostnad och härvid har den i rapporten nämnda Friedland Ton kommit i fokus (Avsnitt 6.3). I Avsnitt 4 och 5 har nämnts att salthalten hos porvattnet kan bli hög – upp till 20 % - och att temperaturen kan bli så hög som 90^{o}C och undersökningar av denna lera har gett besked om funktionssättet som visar att denna typ av naturliga smektitiska leror har en mycket stor användningspotential vid avfallsisolering.

Laboratoriepackning av den undersökta leran med tillsats av olika mängd saltfritt vatten har visat att packbarheten ger hög densitet och inte påverkas mycket av vattenhalten i motsats till blandningar av bentonit/ballast (MX-80/ballast), Figur E.1.

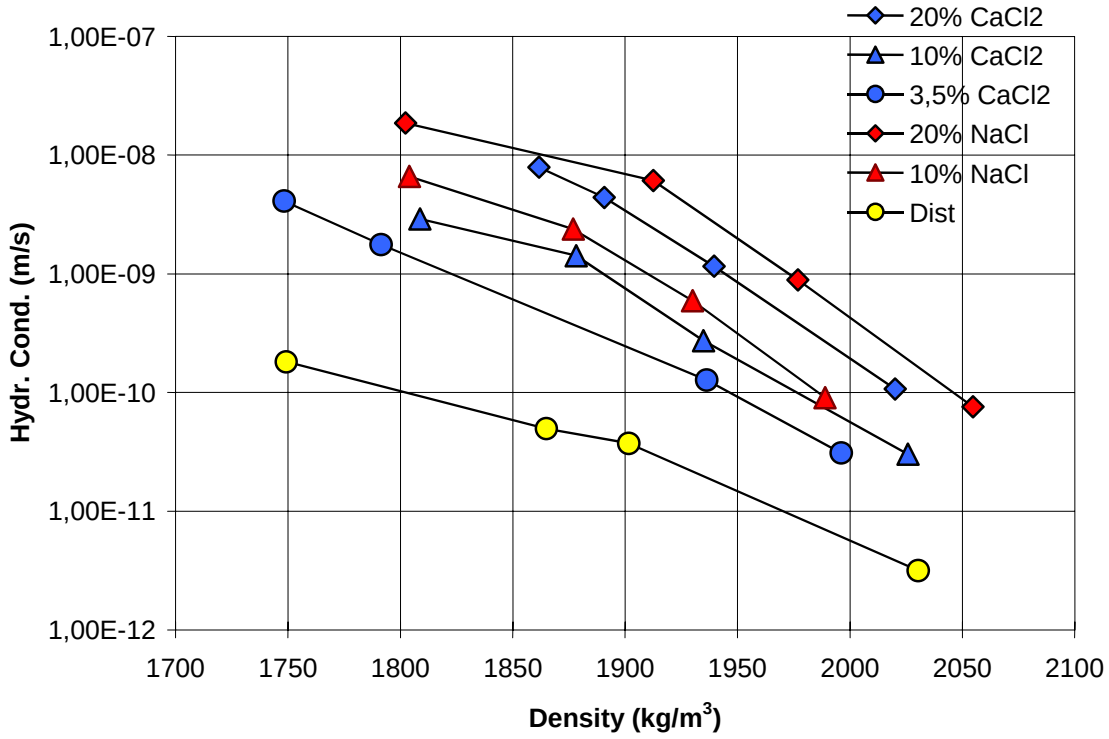
Bestämning av den hydrauliska konduktiviteten vid 20 % salthalt (Ca) har visat att den är lägre än konduktiviteten hos blandningar av 30/70 bentonit/ballast med samma densitet och en salthalt av endast 1 % (Figur E.2). Vid en densitet av 1900 kg/m^3 är konduktiviteten hos den naturliga leran ca E-10 m/s och svälltrycket något mer än 200 kPa då salthalten är 3,5 %. Denna densitet ger ett svälltryck av minst 100 kPa oberoende av saltinnehållet. För blandningar av 30/70 bentonit/sand med densiteten 1900 kg/m^3 upphör i det närmaste svälltrycket redan då porvattnet är något bräckt.

Figur E.3 visar svällningstryckets beroende av densitet vid full mättnad med natrium- och kalciumrika lösningar.

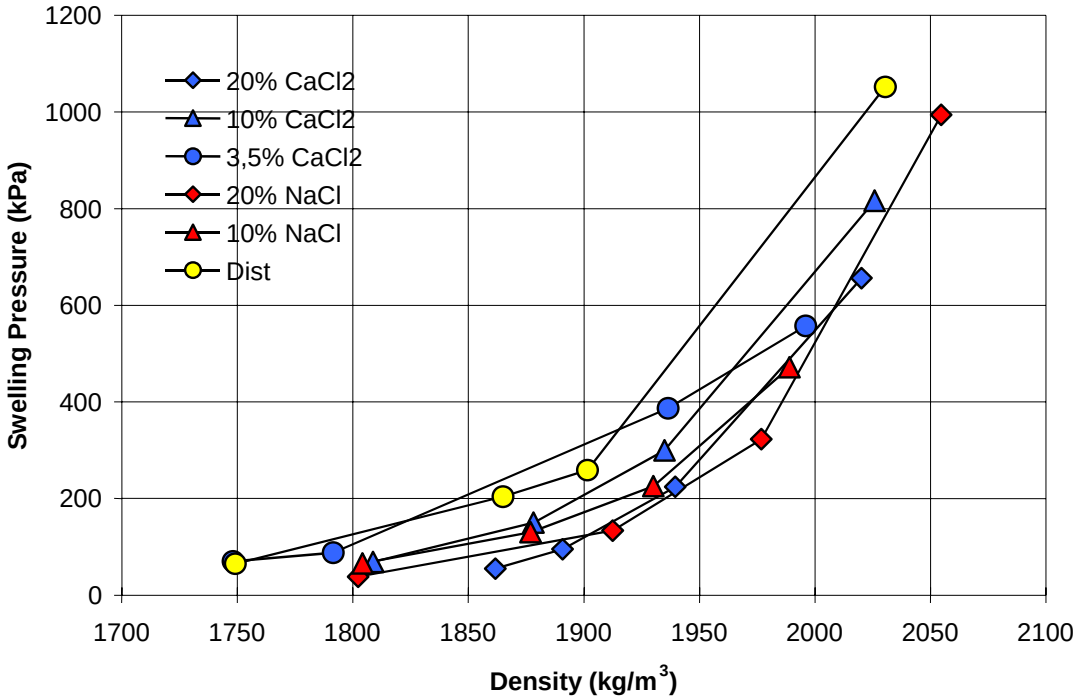
En intressant erfarenhet från genomströmningsförsök med Fiedland Ton illustreras av Figur E.4. Leran packades in i lufttorrt tillstånd och mättades med 20 % $CaCl_2$-lösning och genomströmmades sedan med denna lösning under successiv utvärdering av konduktiviteten. Flödet var inledningsvis högt men minskade och stabiliserades vid en genomsläpplighet av ca 5E-10 m/s. Konduktivitetsfallet berodde i någon mån på svällning hos lermatrisen men mer på att partikelaggregat, som koagulerat i den salta miljön, transporterades i porsystemet och tätade till vissa porer. I efterföljande försök med samma prov skedde genomströmning med destillerat vatten varvid konduktiviteten föll till ca en tiondel och härefter med 10 % $CaCl_2$-lösning varvid konduktiviteten efter ca 2 veckor ställde in sig på ca 1,2 E-10 m/s (Figur E.5). Från praktisk synpunkt är detta ett viktigt fenomen eftersom det visar att partikeltransport har betydande inverkan på tätheten hos barriärer bestående av lerlager. För lermembran är fenomenet utan betydelse; här får man istället beakta risken för uttvättning och borttransport av partiklar från membranet.



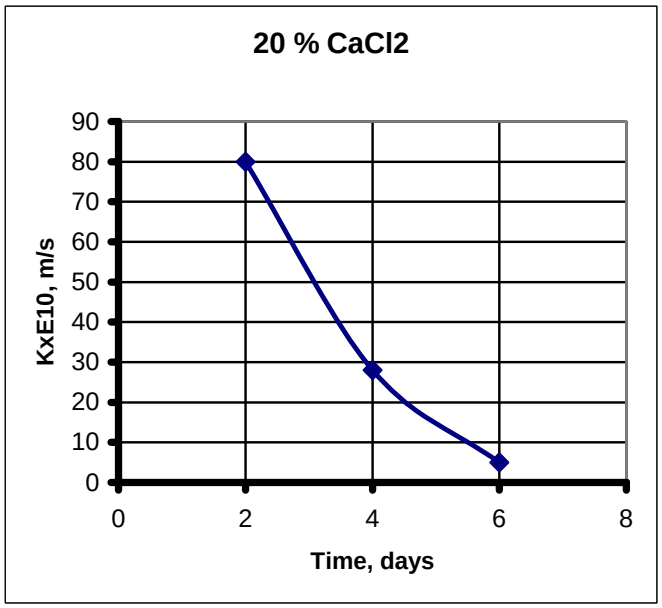
Figur E.1. *Packningsförsök med Friedland Ton. Den kraftiga kurvan visar teoretiska maximala densiteten.*



Figur E.2. *Hydrauliska konduktivitetens beroende av porvattenkemin hos Friedland Ton.*



Figur E.3. *Svällningstryckets beroende av porvattenkemin hos Friedland Ton.*



Figur E.4. *Utvärderad hydraulisk konduktivitet hos Friedland Ton med en densitet av ca 2000 kg/m^3 vid full mättnad med 20 % $CaCl_2$-lösning.*

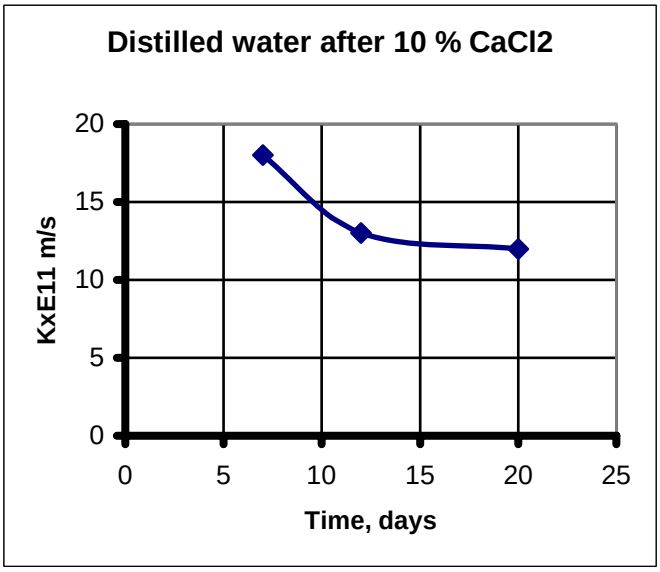


Figure E.5. Hydrauliska konduktiviteten efter genomströmning med destillerat vatten och härefter 10 % $CaCl_2$.