

Utvärdering av grundvattensanering inom Sundsvalls oljehamn

Evaluation of a groundwater remediation
at the Sundsvall Port for petroleum products

Erik Löfgren

REFERAT

Utvärdering av grundvattensanering inom Sundsvalls oljehamn. Erik Löfgren

Sundsvalls oljehamn utgör centrum för lagring och distribuering av petroleumprodukter för mellersta Norrland. Verksamheten har pågått sedan 1930-talet och är förlagd på Vindskärsudde, 2.5 km utanför Sundsvalls centrum. All lagring av oljeprodukter inom hamnen sker i cisterner ovan jord och i bergrumsanläggningar under depåområdena. Olyckor i samband med hantering och lagring av olja inom hamnen har föranlett att stora mängder olja läckt ut i marken genom åren. Golder Associates AB utförde under slutet av 90-talet ett flertal markundersökningar av såväl jord som grundvatten inom området. Det kunde konstateras att stora delar av hamnen var kraftigt förorenade av petroleumkolväten och att olja i fri fas låg ovanpå grundvattenytan i flera punkter. Detta föranledde att ett saneringsprojekt inleddes sommaren 2004 där den fria fasen avlägsnas genom vakuumextraktion s.k. bioslurping.

Genom hamnens saneringsprogram görs mätningar kontinuerligt av oljeskikt i grundvattenbrunnar. Mätningarna används för att styra saneringsarbetet eftersom projektets avslutningskriterium är baserat på ett maximalt oljeskikt i grundvattenbrunnarna. Hur mätningarna förhåller sig till det verkliga oljeskiktet i marken är något som diskuterats i projektgruppen vid flera tillfällen. Studier påvisar att oljeskiktet i en brunn sällan stämmer överens med det verkliga. Det beror på att jordens kapillära krafter och typ av oljeförorening är avgörande för hur jämvikten mellan brunn och jordlager inställer sig. Det kan förklara flertalet av de problem som uppstått i grundvattensaneringsarbetet.

Syftet med examensarbetet var att utvärdera grundvattensaneringen inom Sundsvalls oljehamn. Det gjordes genom att initialt ta fram platsspecifika samband för hur det observerade oljeskiktet i grundvattenbrunnarna förhåller sig till verklig föroreningsmängd i mark. Med det som utgångspunkt kunde den totala mängden olja inom hamnen och dess förändring över tid uppskattas. Syftet med studien var även att uppskatta saneringsprojektets framtidsutsikter samt identifiera eventuella spridningsmönster. Som utvärderingsverktyg användes det amerikanska petroleuminstitutets LNAPL Distribution and Recovery Model och programvaran ArcGIS 9.2.

Studien visade att skillnaden mellan det observerade oljeskiktet i grundvattenbrunnarna och det beräknade oljeskiktet i mark är stor, särskilt i täta jordlager med tyngre oljeföroreningar. Det förklarar bl.a. skillnaden i saneringspotential mellan olika depåområden. Vidare uppskattades den totala mängden olja i fri fas innan saneringsarbetet påbörjades till 300 kubikmeter. Det är klart mindre än tidigare uppskattningar. Av den beräknade oljevolymer uppskattades drygt 160 kubikmeter utgöra mobil olja. Det är den fraktion som är tillgänglig vid in-situ sanering. De teoretiska beräkningarna påvisade även att den mobila volymen halverats i juli 2007 som en följd av saneringsarbetet. Det stämmer väl överens med inrapporterade oljevolymer som pumpats upp av saneringsentreprenören under samma tidsperiod. Det stärker uppskattningsmetodens tillförlitlighet. En prognos över det fortsatta saneringsarbetet var svårt att upprätta eftersom projektets avslutningskriterium är satt på vaga grunder. För att kunna upprätta en mer tillförlitlig prognos över det fortsatta arbetet och för att öka effektiviteten i saneringen är det nödvändigt att omdefiniera avslutningskriteriet.

Nyckelord: Oljehamn, sanering, grundvatten, förorening, olja, LNAPL, LDRM

Institutionen för Geovetenskaper, Uppsala Universitet, Villavägen 16, SE-752 36 UPPSALA
ISSN 1401-5765

ABSTRACT

Evaluation of a groundwater remediation at the Sundsvall Port for petroleum products.

Erik Löfgren

The Sundsvall Port for petroleum product distribution constitutes the centre for storage and distribution of petroleum products for the central parts of Norrland, Sweden. The port is situated at Vindskärsudde, 2.5 km from the centre of Sundsvall and was initially developed in the 1930's. Storage of petroleum products is carried out in above ground tanks or in underground storage facilities. Accidents related to storage/distribution activities within the port have led to leakage of petroleum products to the subsurface. Golder Associates AB performed several environmental site investigations in the late 1990's. It was concluded that a large area of the harbour was severely contaminated and that free phase petroleum products, (LNAPL), were present in several locations. For these reasons a remediation project was initiated in the summer of 2004 involving the removal of LNAPL through bioslurping.

Measurements of the LNAPL thickness and groundwater level in monitoring wells are performed continuously through the remediation program of the port. The remediation completion target is based on achieving a maximum thickness of LNAPL in all monitoring wells and this target is used to manage the bioslurping process. The representativity of the measurements to evaluate the remediation is widely discussed within the project team. Studies have shown that the LNAPL thickness in a groundwater well may not represent the true LNAPL layer in the soil. These studies indicate that the measured LNAPL thickness in the well is affected by capillary forces in the soil and the LNAPL's physical properties. This could possibly explain a number of drawbacks/problems in the remediation project.

The purpose of this thesis work was to evaluate the groundwater remediation project at the Sundsvall Port of petroleum product distribution. Initially this work was performed by developing site-specific empirical relationships between measured LNAPL well thickness and the LNAPL concentration in soil. These relationships were then used to estimate the total LNAPL volume at site and its change over time. A forecast of the potential outcomes of the remediation project was also made. The American Petroleum Institute's LNAPL Distribution and Recovery Model and the software ArcGIS 9.2 were used as evaluation tools.

The study concluded that a difference between the LNAPL well thickness and the true LNAPL layer in the soil is evident, in particular in capillary soils with heavy LNAPLs. This could explain the differences in LNAPL recovery between different areas within the port. Furthermore, the total amount of LNAPL before the remediation was initiated was estimated to be approximately 300 m³, of which 162 m³ was assumed to be mobile and thereby available for in-situ remediation. Theoretical calculations indicate that approximately half of this amount of LNAPL had been removed by July 2007. This correlates with the LNAPL recovered during the same time period, which strengthens the evaluation method's reliability. A reliable forecast of the potential remediation outcomes was difficult to generate due to the project's vague remediation completion target which directs the bioslurping program. In order to develop a more reliable forecast of the remediation outcomes and to avoid further migration of LNAPL, it is necessary to redefine the remediation goals.

Keyword: port, remediation, LDRM, groundwater contamination, oil, LNAPL, petroleum

Department of Earth Sciences, Uppsala University, Villavägen 16, SE-752 36 Uppsala
ISSN 1401-5765

FÖRORD

Detta examensarbete ingår som en avslutande del i civilingenjörsutbildningen i miljö- och vattenteknik vid Uppsala universitet och omfattar 20 högskolepoäng. Arbetet har utförts på Golder Associates AB i Stockholm och på plats i Sundsvall. Handledare på företaget har varit Thomas Jansson och ämnesgranskare Roger Herbert vid Institutionen för geovetenskaper, Luft-, vatten och landskapslära, Uppsala universitet. Examinator har varit Allan Rodhe, professor i hydrologi vid Institutionen för geovetenskaper, *Luft-, vatten och landskapslära*, Uppsala universitet. Tack samtliga för handledning och ert engagemang!

Jag vill även rikta ett stort tack till Kim Forchhammer och Mårten Osanius på Golder för att ni agerat bollplank liksom stått för expertis då det stått still.

Stockholm, januari 2008

Erik Löfgren

POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

Olja är en generell benämning på organiska vätskor som är olösliga i vatten och har som grundvatten- och markförorening speciellt uppmärksammats de senaste 20 åren. Utsläpp av olja, t.ex. bensin och diesel, är vanligt förekommande på bensinstationer, industrier och i samband med oljetransporter och utgör en risk för människan och naturen på flera sätt. Ett av de vanligaste miljöproblemen är förorenade och därmed förstörda dricksvattentäkter.

När olja släpps ut i ansenlig mängd vid markytan rör den sig genom jorden ned mot grundvattenytan. Eftersom olja är lättare än vatten kan oljan ansamlas ovanpå grundvattnet och bilda ett oljeskikt. Lutar grundvattenytan, t.ex. p.g.a. topografin, kan oljan spridas till områden som ligger nedströms.

Inom Sundsvalls oljehamn, som ligger ett par kilometer öster om Sundsvalls centrum, finns stora mängder olja ovanpå grundvattnet. Oljan har främst läckt ut i marken i samband med lossning av oljetankers och från trasiga ledningar i marken. För att kunna uppskatta hur mycket olja som finns i marken har ett flertal grundvattenbrunnar installerats i området. De är plaströr som förses med ett filter i nivå med grundvattenytan så att bara grundvatten och olja kan rinna in i brunnen. Traditionellt sett har man trott att oljan som ställer sig i grundvattenbrunnen representerar verkligheten. Dvs. att oljeskiktet som bildas i brunnen är lika tjockt som oljeskiktet i marken. Idag vet man att det verkliga oljeskiktet är tunnare och att sambandet styrs av en rad parametrar. Dessa kan uppskattas i laboratorium och beror av vilken jordart och oljeförorening som finns i anslutning till grundvattenbrunnen. Därför finns det olika samband i ett område, så som Sundsvalls oljehamn, där jordarten och oljans sammansättning varierar kraftigt. För att få fram sambanden krävs det avancerade matematiska beräkningar och som hjälpmedel kan man använda en modell. Det amerikanska petroleuminstitutet har utvecklat en sådan som heter LNAPL Liquid and Distribution Model (LDRM). LNAPL är en benämning på lätta vätskor som är olösliga i vatten och står för Light Non-Aqueous Phase Liquids. Modellen har använts i detta examensarbete för att ta fram samband för ca 290 grundvattenbrunnar inom hamnområdet. Generellt sett så är skillnaderna mellan oljeskiktet i grundvattenbrunnen och ute i marken som störst i täta jordar (t.ex. lera) och inom områden med tyngre oljeföroreningar (t.ex. diesel). Skillnaderna är som minst i områden med sandiga jordar och lättare oljeföroreningar (t.ex. bensin).

Eftersom Sundsvallsfjärden och Sundsvallsåsen (en potentiell dricksvattentäkt) ligger nedströms Sundsvalls oljehamn finns det en stor risk att oljan kan orsaka stor skada. Därför har Sundsvalls kommun ställt krav på oljebolagen som finns inom Sundsvalls oljehamn att oljan ska saneras. Sommaren 2004 inleddes därför en grundvattensanering där olja suggs upp ur marken genom bioslurping. Metoden går ut på att man installerar grundvattenbrunnar i områden där det finns olja ovanpå grundvattenytan. Brunnarna tätas upp till och kopplas till en vakuumpumpanläggning. Den skapar ett vakuum i grundvattenbrunnarna som gör att luft, olja och vatten strömmar till från områden runt omkring. Ur brunnen sugas sedan blandningen till markytan där luften separeras med ett filter. Den resterande blandningen körs sedan vidare till en cistern där olja och vatten får stå till dess de avskilts. Eftersom ny luft måste ersätta den uppsugna luften ökas syrehalten i marken. Det gör att mikrobakterier trivs bättre och den biologiska nedbrytningen av olja ökar.

För att kunna utvärdera saneringsarbetet på ett bra sätt är det nödvändigt att veta hur mycket olja som finns inom hamnen och hur mängden olja minskar under saneringsarbetet. En volymuppskattning som gjorts tidigare och som fått störst medial uppmärksamhet är Statens Geotekniska Instituts (SGI). De hävdade år 2001 att det fanns 2 000 – 6 000 kubikmeter olja

inom hamnområdet. Inom ramen för detta examensarbete har motsvarande volym beräknats. Det gjordes genom att använda sambanden för grundvattenbrunnarna inom hamnområdet, mätningar i dem samt ett datorprogram för GIS (Geografiska Informationssystem). Det sistnämnda är ett verktyg för att hantera geografisk information och kan användas för att uppskatta oljeskiktets tjocklek i områden mellan grundvattenbrunnarna. Resultatet av beräkningarna visade att den totala volymen av olja före saneringen var ca 300 kubikmeter, dvs. minst en femtondel av SGI:s uppskattning. Eftersom en fraktion av oljan är bundet till markens jordpartiklar är det enbart en del av den totala oljevolymen som kan saneras. Denna mobila fraktion har uppskattats till 160 kubikmeter olja.

Fram till juli 2007 hade ca 100 kubikmeter olja sugits upp ur marken och mycket tyder på att det mesta av oljan är borta från grundvattenytan. För varje år som gått sedan starten 2004 har mängden olja som sanerats halverats och om arbetet fortsätter på samma sätt uppskattas 5-10 kubikmeter kunna saneras 2008. Den volymen är mindre än vad teoretiska beräkningar visar och kan eventuellt förklaras av att saneringsarbetet idag är ineffektiv. Det beror till stor del av de åtgärdsåtgärder som definierats av kommunen tillsammans med Sundsvalls oljehamn. Åtgärdsåtgärden är satt så att det ska saneras till dess att oljeskiktet i grundvattenbrunnarna är maximalt 5 cm. Eftersom ett sådant oljeskikt motsvarar helt olika oljeskikt i verkligheten är det missvisande. Förslagsvis bör nya åtgärdsåtgärder definieras för delområden där indelning sker utifrån jordart och oljetyp. För varje delområde kan sedan nya åtgärdsåtgärder utarbetas som baseras på det verkliga oljeskiktets tjocklek i marken, hur mobil oljan är och vilka risker oljan utgör för Sundsvallsåsen och Sundsvallsfjärden. Endast då kan det fortsatta saneringsarbetet ske på ett effektivt sätt så att områden med mycket och spridningsbenägen olja kan saneras.

Innehållsförteckning

1. INLEDNING	1
1.1 Syfte	1
2. BAKGRUND	2
2.1 Områdesbeskrivning	2
2.2 Verksamhetsbeskrivning	2
2.3 Geologi	3
2.4 Hydrogeologi	4
2.5 Föroreningsituation och saneringen	5
3. TEORI	8
3.1 Olja i fri fas i marken	8
3.1.1 Allmänt	8
3.1.2 Ytspänning och vätning	8
3.1.3 Kapillaritet och pF-kurva	9
3.1.4 Relativ permeabilitet	11
3.2 Olja och grundvattenbrunnar	12
3.2.1 Allmänt	12
3.2.2 Distribution av tryck i markprofilen	12
3.2.3 Oljans distribution i markprofilen	15
3.2.4 Beräkning av specifik volym olja i fri fas	16
4. UTFÖRANDE	17
4.1 Provtagning	17
4.1.1 Provtagning av jord	17
4.1.2 Provtagning av olja	18
4.2 LDRM och relation mellan observation i brunn och volym i mark	18
4.2.1 Modellens jordparametrar	19
4.2.2 Modellens föroreningsparametrar	19
4.2.3 Framtagning av samband för olika föroreningsituationer	19
4.3 Uppskattning av oljevolymin i mark och dess förändring över tid	20
4.3.1 Observationer	20
4.3.2 Uppskattning av oljevolymin i marken inom hamnområdet	21
4.4 Spridning av olja	21
5. RESULTAT	22
5.1 Relation mellan observation i brunn och volym olja i mark	22
5.2 Mängd olja i marken före saneringen	23
5.3 Oljevolyminförändring	25
5.3.1 Före sanering	25
5.3.2 Under sanering	27
5.3.3 Validering av metod	28
5.4 Spridning av olja	28
6. DISKUSSION	29
6.1 Relation mellan observation i brunn och volym olja i mark	29
6.2 Mängd olja inom Sundsvalls oljehamn före saneringen	29
6.3 Oljevolyminförändring och uppskattningsmetod	30
6.4 Spridning	30
6.5 Felkällor	31
6.6 Avslutningskriterie och prognos	31
6.7 Förslag till fortsatt mät- och saneringsprogram	32

7. SLUTSATSER	34
8. KÄLLFÖRTECKNING	35
8.1 Litteratur.....	35
8.2 Kartor	36
8.3 Datorprogram	36

Bilaga 1	Situationsplan
Bilaga 2	Provtagningskarta och provtagningsprotokoll
Bilaga 3	Kornstorleksanalys
Bilaga 4	Matematiska samband mellan observerad oljetjocklek i grundvattenbrunn och specifik volym i mark
Bilaga 5	Oljevolymförändring inom olika depåområden

1. INLEDNING

Sundsvalls oljehamn utgör centrum för hantering och lagring av petroleumprodukter för mellersta Norrland. Verksamheten har pågått sedan 1930-talet och har successivt byggts ut under årens lopp. All lagring av oljeprodukter sker i ovanjordcisterner alternativt i bergrumsanläggningar direkt under depåområdena. Olyckor i samband med hantering av olja inom området har föranlett att stora mängder olja läckt ut i marken genom åren, speciellt i samband med lossning av oljetankers. Visst spill har även skett från markförlagda ledningar. Golder Associates AB engagerades våren 1997 för miljötekniska markundersökningar på ett delområde inom hamnen och har sedan dess utfört undersökningar av såväl jord som grundvatten inom hela Sundsvalls oljehamn. Det har konstaterats att stora delar av hamnen är kraftigt kontaminerat och att olja i fri fas ligger ovanpå grundvattenytan. Under sommaren 2004 inleddes därför en grundvattensanering där den fria oljefasen avlägsnas genom vakuumenträktion, s.k. bioslurping.

I september 2007 hade knappt 100 kubikmeter olja sugits upp ur marken genom bioslurping. Denna siffra förväntades dock vara större då det inledande pilotprojektet och mätning av den fria oljefasen i grundvattenbrunnar indikerat att det fanns mycket större mängder ovanpå grundvattnet. Saneringsframgångarna inom flera områden var dock knappa. Detta var anledningen till att man i projektgruppen började diskutera hur relationen mellan det observerade oljeskiktet i grundvattenbrunnarna förhöll sig till den verkliga mängden fri fas olja i marken. Det har konstaterats att silthalten i jorden inverkar på sambandet men att mer information är nödvändig för att på ett bra sätt kunna förklara föroreningssituationen och kunna utvärdera saneringsarbetet.

1.1 Syfte

Syftet med examensarbetet är att utvärdera grundvattensaneringen inom Sundsvalls oljehamn. Detta ska uppnås genom att:

- undersöka hur det teoretiska sambandet mellan det observerade oljeskiktet i grundvattenbrunnen förhåller sig till verklig föroreningsmängd i mark
- uppskatta utifrån sambandet hur mycket olja som finns i marken inom hamnområdet och hur mycket av den som kan anses vara mobil och därmed tillgänglig vid saneringen
- uppskatta hur oljevolymer i marken förändrats före och under saneringsarbetet
- uppskatta spridningsmönster för oljan i marken
- upprätta en prognos över det fortsatta saneringsarbetet

2. BAKGRUND

2.1 Områdesbeskrivning

Fastigheten där Sundsvalls oljehamn är belägen omfattar c:a 16 hektar och benämns Skönsmon 2:1. Den avgränsas i norr och öster av Sundsvallsfjärden, i väster av industriområden och i söder av E4:an och Sundsvallsåsen (se figur 1). Topografin inom området är relativt flack, med undantag för de nordvästra delarna där berg går i dagen. Växtligheten är begränsad med undantag för Minneslundan, där björk och sly avskärmar hamnen från E4 och Sundsvallsåsen.



Figur 1 - Flygfoto från söder över Sundsvalls oljehamn. Vy mot norr (OK Q8 AB, 2003-09-22).

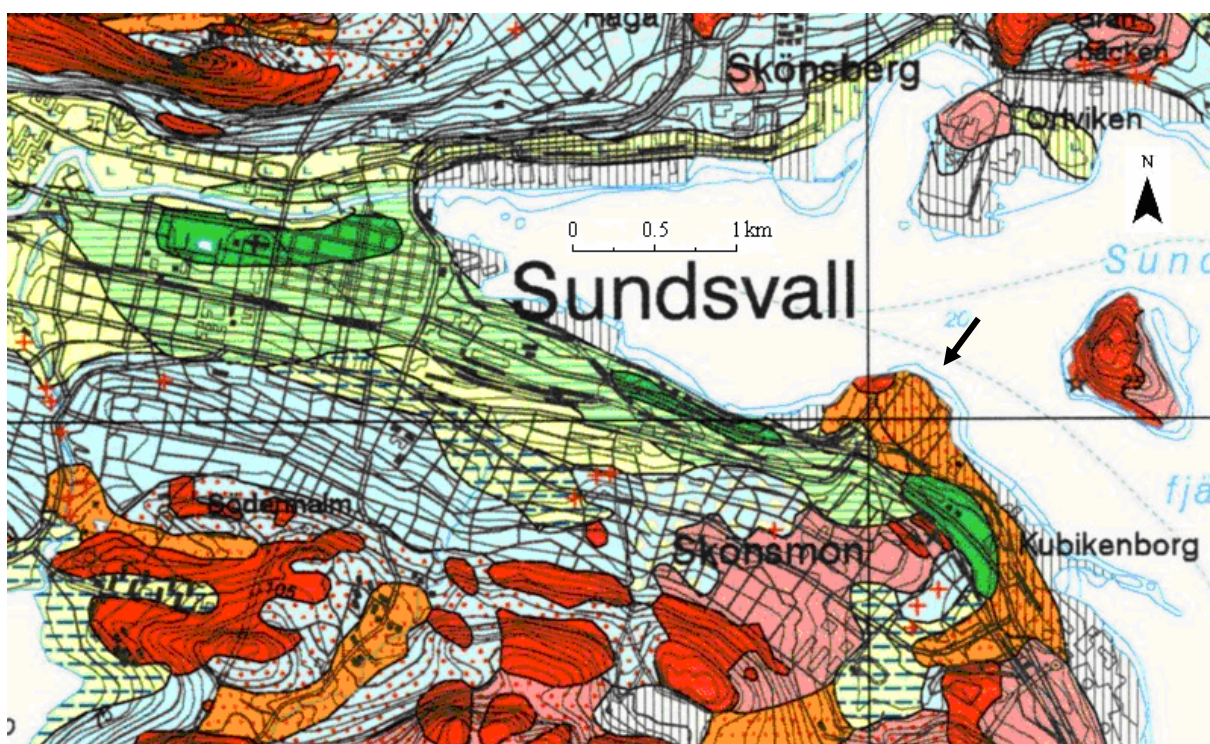
2.2 Verksamhetsbeskrivning

De första oljedepåerna inom Sundsvalls oljehamn uppfördes på 1930-talet i de västra delarna av området. Därefter byggdes hamnen ut i etapper. Omsättningen inom hamnområdet var som störst under 80- och 90-talet, för att under de senaste åren trappas ned. Verksamheten koncentreras till lagring, hantering och distribuering av bensen, diesel, eldningsolja, flygfotogen, additiver m.m. All lagring sker i cisterner ovan jord samt i bergrum belägna direkt under depåområdena (Jansson, 1998).

Företag som BP, Esso, Gulf, Nynäs, Shell och Texaco har tidigare varit verksamma inom hamnen men genom sammanslagning och omstruktureringar är antalet oljebolag idag reducerat till fyra stycken: OKQ8, Svenska Statoil, Preem Petroleum AB samt Norrdepot AB. Idag står stora delar av hamnens cisterner tomma och underhålls i beredskapssyfte.

2.3 Geologi

Enligt SGU:s jordartskarta (Kvitt JOGI 17H Sundsvall SO) över Sundsvall består Vindskärsudde av sand och fraktioner av åsmaterial (se figur 2). De markundersökningar som har gjorts av området visar på en mycket stor variation. Jordlagerföljden har väl dokumenterats i samband med uppförandet av cisterner, vid Golders markundersökningar samt vid borrning av brunnar som idag ingår i hamnens kontroll- och saneringsprogram. Typiskt överlagras den naturliga jorden av en grus- och sandfyllning med en mäktighet på 1 - 3 meter. Fyllningen består på sina håll av avfallsrester som ofta kan härledas till tidigare verksamheter (bl.a. soptipp).



Figur 2 – Urklipp ur jordartskartan. Den orangefärgade udden (indikerat med pilen) är Vindskärsudde där Sundsvalls oljehamn är belägen. Området utgörs av sand med inslag av åsmaterial. Det grönmärkerade området söder om hamnen är Sundsvallsåsen.

De naturliga jordarna är av sedimentär art och varierar från lera till grusig sand. Skiftning och linser är mycket vanligt förekommande fenomen inom området. Dessa kan härledas till issmältningen och tidigare havsnivåförändringar. Då geologin är tämligen komplicerad inom de olika depåområdena beskrivs de separat nedan. Lokaliseringen av företagets depåområden redovisas i bilaga 1.

OKQ8: Fyllningen inom området består av grus och sand som ställvis uppgår till ett par meter. I de centrala, sydliga och östra delarna underlagras fyllningen av sandig silt med sandlager av varierande mäktighet. I de västliga delarna underlagras fyllningen av 1-2 meter lera som mot djupet övergår till sandig silt.

Norddepot: Inom Norddepots område överlagras den naturliga jorden av 1-3 m grusig/sandig fyllning med inslag av rivningsmaterial och avfallsrester. Berg har påträffats på flera platser

kring 3-5 m vilket indikerar ett tunt jordlager. Den naturliga jorden består i de västliga delarna av siltig sand som österut övergår till siltigare material. Längst i öster är den naturliga jorden ren silt.

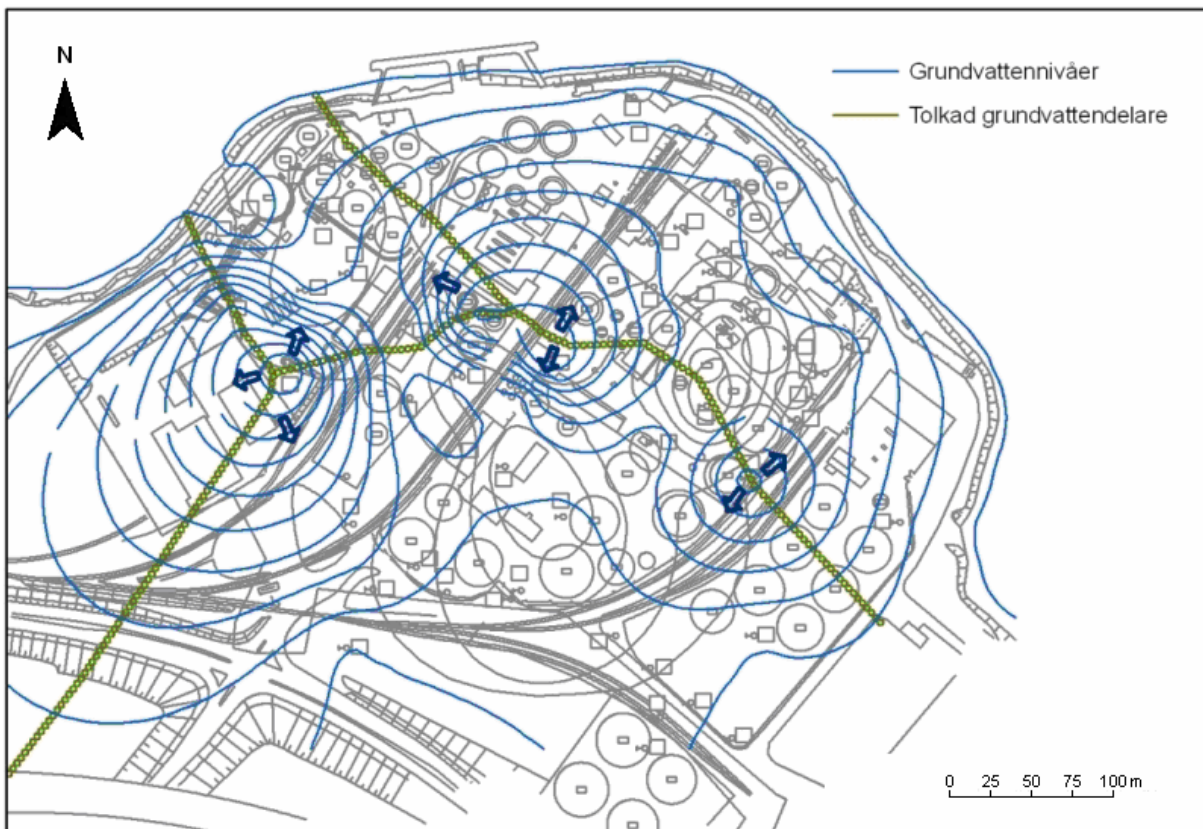
Preem område 2: Preem område 2 tycks ha liknande markförhållanden som Norddepot. Fyllningen består av grus och sand med inslag av avfallsrester och den naturliga jorden är i de centrala delarna av depåområdet siltig sand.

Preem område 3 och Oljevägen: Den naturliga jorden i de centrala och östliga delarna av området tycks stämma väl överens med de västliga delarna av OKQ8. Ett 1-2 meter tjockt fyllnadsmaterial underlagras av 1-2 meter tjock lera. Denna övergår mot djupet till en sandig silt.

Statoil: Inom stora delar av depåområdet finns berg i dagen. Geotekniska undersökningar från cisternområdet visar på ytligt berg som ställvis överlagras av morän eller fyllning. De södra delarna av området har en större jordmaktighet och den naturliga jorden består av sand med ler och siltskikt.

2.4 Hydrogeologi

Under 2004 utarbetats det en grundvattenmodell över Sundsvalls oljehamn (Osanius, 2007). Denna bekräftar tidigare antaganden om att grundvattenflödet huvudsakligen sker mot Sundsvallsfjärden och i söder mot Sundsvallsåsen. Tolkade grundvattendelare samt nivåer visas i figur 3.



Figur 3 – Schematisk bild över Vindskärsudde där tolkade grundvattendelare (gröna sammanbundna ringar), flödesriktning och isolinjer för grundvattnet ritats in. Jansson (1999), Osanius (2007).

Berget i den nordvästra delen av hamnen utgör en grundvattendelare och sluttar brant ned mot Sundsvallsåsen. Bergrum breder ut sig under stora delar av hamnen, speciellt i de västra och nordliga delarna. Det komplicerar grundvattenmönstret en del. Sprickzoner i anslutning till bergrummen gör grundvatteninträngning möjlig och för att hålla bergrummen fria från vatten används s.k. grundvattenridåer. Det innebär att grundvatten pumpas från berg som omsluter bergrummen för att hålla oljan fri från vatten. En konsekvens av detta är att det bildas en nedåtriktad hydraulisk gradient i anslutning till bergrummen som sänker av grundvattenytan. Det har bekräftats i Golders hydrogeologiska undersökningar (Jansson, 1998).

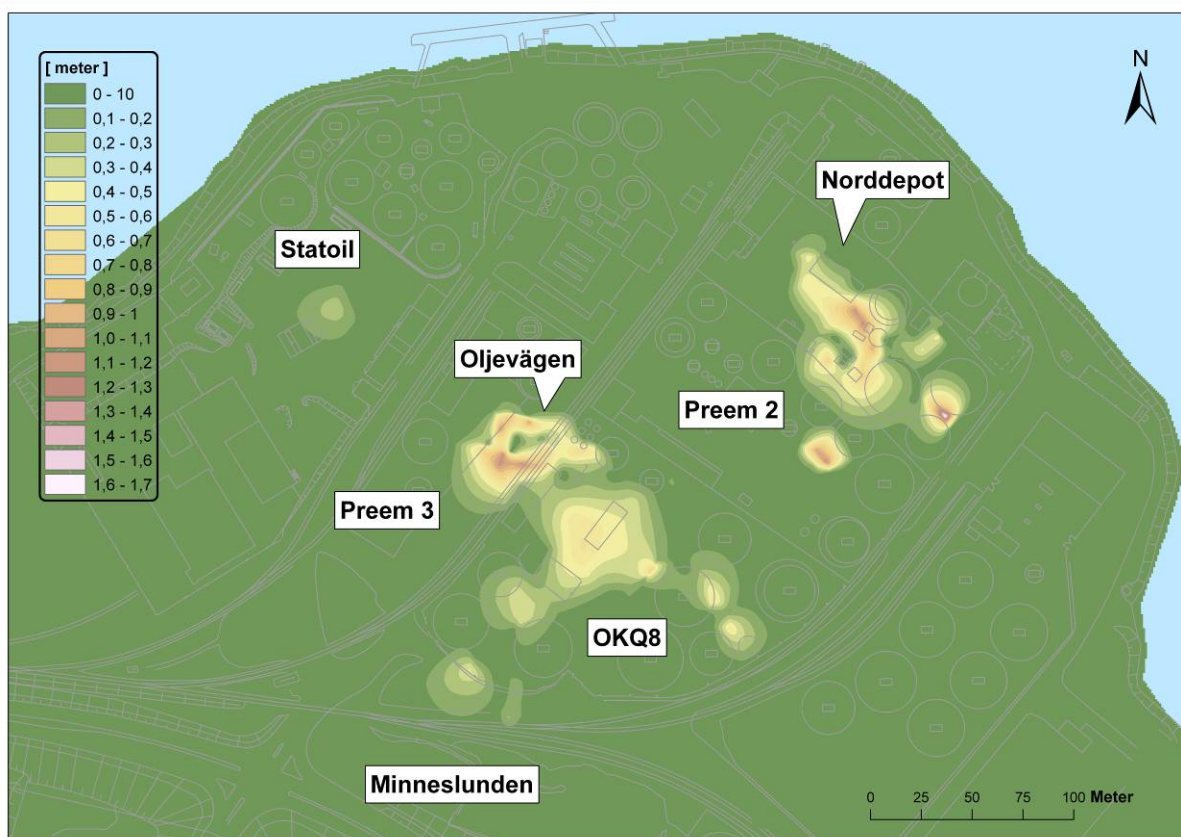
2.5 Föroreningsituation och saneringen

I Golders markundersökningar (Jansson, 1998 och 1999) togs åtskilliga jordprover där tidigare utsläpp och läckage skett. Inom ramen för studierna installerades även grundvattenrör i syfte att kartlägga utbredningen av olja i fri fas. Det konstaterades att marken inom hamnen var mycket förorenad av petroleumkolväten och att olja i fri fas påträffats i ett flertal punkter. Eftersom den fria fasen kan spridas ovanpå grundvattenytan bedömdes den utgöra en stor risk. Observationer gjorda i samband med markundersökningen verifierade att olja i fri fas rör sig enligt hydrogeologiska mönster (se figur 3) och sprids mot Sundsvallsåsen och Sundsvallsfjärden.

Under sommaren 2004 inleddes en grundvattensanering inom Sundsvalls oljehamn där den fria oljefasen avlägsnas genom bioslurping (för utförlig metodbeskrivning se Miller, 1996). Cirka 180 saneringsbrunnar har installerats i området och ur varje brunn sugs en blandning av olja, grundvatten och porluft upp via ett rör med vakuumpump. Eftersom brunnen är försluten upptill uppstår ett undertryck i brunnen. Det skapar en inåtriktad tryckgradient vilket gör att

vatten liksom olja i jordlagret strömmar mot röret. Blandningen som suggs upp går sedan genom en cyklon där luften filtreras ut. Därefter transporteras olja- och vattenblandningen till en cistern för avskiljning. Bioslurping fungerar även som bioventilation eftersom porluften som suggs ur markzonen hela tiden ersätts. Ventilationen ökar syretillgången och därmed den biologiska nedbrytningen i den omättade zonen.

Genom hamnens kontroll- och saneringsprogram pejas ett stort antal grundvattenbrunnar kontinuerligt. Det görs av hamnpersonal och entreprenören med ett s.k. tvåfaslod. Lodet indikerar övergång mellan olika faser vilket gör det möjligt att mäta oljeskiktet i grundvattenbrunnen. Hur mycket olja som finns i brunnar inom hamnen kan uppskattas genom interpolation av det genomsnittliga observerade oljeskiktet i grundvattenbrunnarna (se figur 4).



Figur 4 - Interpolation av genomsnittlig observerad oljetjocklek i brunnar vid saneringsprojektets början. Kartan är skapad i ArcMap 9.2 i enlighet med vad som beskrivs i avsnitt 4.3.2.

Fram till september 2007 hade ca 100 kubikmeter olja sugits upp m.h.a. av bioslurping-metoden. Uppfodringshastigheten av olja har sedan start kontinuerligt minskat och idag anser man att vissa områden av Sundsvalls oljehamn är rena från den fria fasen. På de resterande områdena varierar saneringsframgångarna kraftigt. Inom OKQ8:s depåområde och under Oljevägen finns stora mängder olja kvar och saneringen är fortfarande effektiv. Inom andra områden som Norddepot och Preem 2 är de upptagna volymerna mycket knappa, även om pejling i grundvattenbrunnar visar att stora mängder olja finns kvar ovanpå grundvattenytan.

Kemiska analyser av olja i marken från olika depåområden visar att oljans sammansättning varierar. Oljeprov som tagits från Preem område 2 har klassificerats som diesel med några procents inblandning av tjockolja. Föroreningen ansågs ha hög grad av nedbrytning (Jansson, 2002). Oljeprov från OKQ8:s område har klassificerats som en blandning av diesel och bensin, där dieselinblandningen har låg grad av nedbrytning. Vidare har oljeprov från Preem område 3/Oljevägen klassificerats som bensin med inblandning av gasolja (diesel) med låg grad av nedbrytning. Flampunktstester som gjorts av olja från flertalet depåområden indikerar att oljans sammansättning inne på Norddepot är av tyngre slag och troligtvis liknande den som påträffats inne på Preem 2.

3. TEORI

Olja som grundvatten- och markförorening har speciellt uppmärksammats de senaste 20 åren och är ett stort och återkommande problem vid bensinstationer, industrier och raffinaderier. Genom internationell forskning har dock förståelsen för hur oljeföroreningar beter sig i markzonen ökat. Idag finns det modeller som uppskattar oljans distribution i marken, dess spridnings- och saneringspotential osv. En av de mest vedertagna är det amerikanska petroleuminstitutets LNAPL Distribution and Recovery Model (API, 2007). Den rekommenderas av det amerikanska naturvårdsverket (EPA, 2005) och i följande avsnitt ges teorin bakom modellen och hur den kan användas i denna studie.

3.1 Olja i fri fas i marken

3.1.1 Allmänt

Vätskor som är olösliga i vatten och vars densitet är lägre än vatten kallas för LNAPL (Light Non-Aqueous Phase Liquids) och utgörs till stor del av olika typer av oljebaserade drivmedel. Några exempel är bensin, etanol, diesel och jet A1.

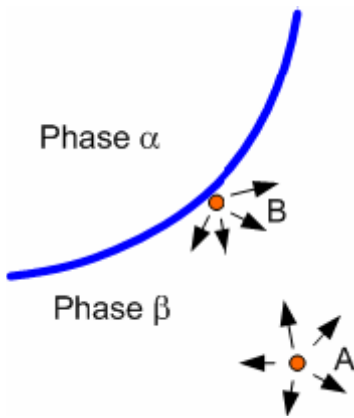
När en olja släpps ut i ansenlig mängd vid markytan rör den sig genom markens porssystem ned mot grundvattenytan. I zonen mellan grundvatten- och markytan kommer då porerna utgöras av luft, vatten och olja, vilkas kvoter varierar med djupet (Fetter, 1999). Är utsläppet tillräckligt stort bildas i anslutning till grundvattenytan ett mobilt oljeskikt, som sprider sig horisontellt under sin egen tyngd och i grundvattnets strömningsriktning.

De första konceptuella modellerna över olja i fri fas i marken (Zilliox och Muntzer, 1975; Ballestero m.fl, 1994) beskrev oljan likt ett mobilt lager flytande ovanpå grundvattenytan. Enligt modellerna kunde oljeskiktets mäktighet mätas i grundvattenbrunnar eftersom energin hos vätskorna inne i brunnen och i jorden ansågs vara lika stor. Extremt stora oljemängder i brunnar som observerades i fält gav dock forskare anledning att utreda sambandet mellan det observerade oljeskiktet i grundvattenbrunnen och det verkliga oljeskiktet i marken.

Idag vet man att oljans fördelning i markprofilen och hur jämvikten mellan brunn och intilliggande jordlager inställer sig beror av en mängd parametrar. Några av de viktigaste är ytspänning, vätning, kapillaritet och relativt permeabilitet. De beskrivs i de kommande avsnitten.

3.1.2 Ytspänning och vätning

En vätska i kontakt med ett annat medium - jordpartikel, annan vätska i egen fas eller gas - har en ytspänning. Denna kan härledas till skillnader i attraktion mellan molekyler vid kontaktytan och ute i lösningen (se figur 5). I ett system där faserna är uppdelade är attraktionen störst av molekyler av samma sort. Därför krävs det en energi att hålla molekyler vid ytan, där det finns en närvaro av molekyler av annat slag. Denna ytenergi – ytspänning - definieras som det arbete som krävs för att hålla de två faserna separerade (Fetter, 1999).



Figur 5 – Ytspänning relaterad till skillnad i attraktion mellan molekyler (API, 2007).

Den vätska som sannolikt väter/blötlägger partikelytorna i jorden kallas för den vätande fasen. Vinkeln θ_C , som visas figur 6, avgör vätningsegenskaperna i marken och beror av ytspänningen mellan vätande fas och jordpartikel (σ_{VP}), mellan icke-vätande fas och jordpartikel (σ_{IP}) samt mellan den vätande och icke-vätande fasen (σ_{VI}). De förhåller sig till vinkeln θ_C enligt ekvation 1.

$$\cos \theta_C = \frac{\sigma_{IP} - \sigma_{VP}}{\sigma_{VI}} \quad (1)$$

Är vinkeln θ_C mellan en fast partikel och en fas större än 90° är det den som är den vätande fasen. Är den mindre än 90° är det den som är den icke-vätande fasen.



Figur 6 – Vätningsegenskaper mellan två vätskor i kontakt med partikelyta. Vinkeln θ_C avgör vilken vätska som är den vätande (API, 2007).

I en oljeförorenad jord är vatten den naturligt vätande fasen, därefter väter olja och sist luft

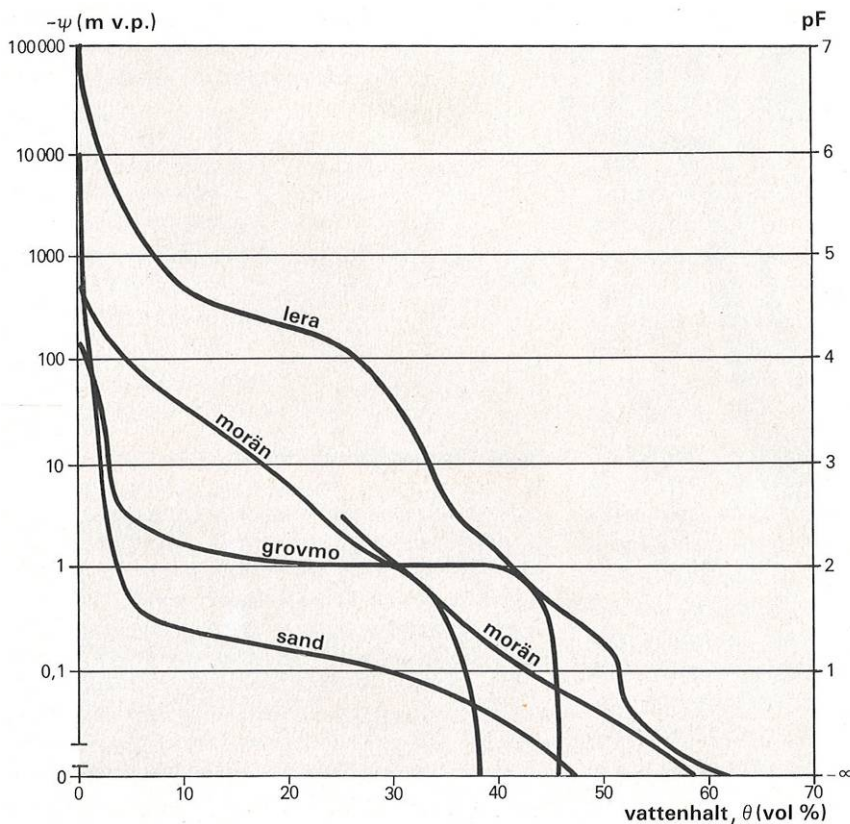
3.1.3 Kapillaritet och pF-kurva

Gränsytan mellan den vätande och icke-vätande fasen tenderar att vara krökt (se figur 6). Ytans krökningsradie varierar med porstorlek och i vilken mängd den vätande och icke-vätande fasen är närvarande. Mäts portrycket i respektive fas upptäcker vi att de skiljer sig åt (Fetter, 1999). Denna skillnad kallas kapillärtryck (p_c) och beror av ytspänningen (σ), kontaktvinkeln (θ_C) och medelkrökningsradien av kontaktytan (r) och ges enligt ekvation 2.

Det antas ofta att radien av en por som innehåller en gränsyta av vätande och icke-vätande fas är densamma som medelkrökningsradien (API, 2007).

$$p_c = \frac{2\sigma \cos(\theta_c)}{r} \quad (2)$$

Ett sätt att avgöra hur vatten (den vätande fasen) fördelar sig i den omättade zonen är att relatera kapillärtryck till vattenhalt. Genom att mäta hur mycket vatten som dräneras vid varierande undertryck fås ett samband fram. Det kallas för jordens bindningskaraktäristiska eller pF-kurva. Kurvans utseende (se figur 7) ger oss information om hur jordens porer dräneras vid olika bindningstryck och är direkt beroende av jordens textur. I en lerig jord där porerna är ytterst små är vattnet hårt bundet och det krävs ett stort undertryck för att dränera det. Sorterade jordar, där variationen av partikelstorlekar är liten, har ett snävt porstorleksintervall. Det innebär att sorterade jordar dräneras inom ett litet tryckintervall. Det skapar platåer i pF-kurvan.



Figur 7 - pF-kurvor för olika typer av jordarter (Grip & Rodhe, 1994).

pF-kurvan anpassas ofta till matematiska modeller för att kunna användas i kvantitativa analyser. En av de vanligaste modellerna har utarbetats av van Genuchten (1980). Det är en parameterisering av pF-kurvan och ges enligt ekvation 3.

$$S_{e[v]} = ((1 + \alpha h_c)^N)^{-M} \quad (3)$$

I ekvation 3 är $S_{e[v]} =$ effektiv mättnad för vatten och α , N och M är modellparametrar. Den kapillära tryckpotentialen, h_c , är direkt relaterad till kapillärtrycket p_c och vattnets densitet ρ_v och ges enligt ekvation 4.

$$h_c = \frac{P_c}{\rho_v g}. \quad (4)$$

Parametrarna α och N kan användas för att karaktärisera jordens textur. Mindre värden av α motsvarar mindre porstorlekar. Mindre värden av N motsvarar ett större intervall av porstorlekar. M definieras utifrån vald relativt permeabilitetsmodell (se avsnitt 3.1.4 Relativ permeabilitet) och beror av N.

Jordens pF-kurva tas generellt fram för ett vatten-luft-system, men kan genom skalningsparametrar uppskattas för andra system. I ekvation 3 kan vi se att parametern α är direkt associerad med den kapillära tryckpotentialen (h_c). Eftersom kapillärtrycket direkt beror av ytspänning (se ekvation 2) kan skillnader i ytspänningen användas för skalning. Parametern α för faskombinationerna olja-vatten och luft-olja kan då ges då enligt ekvation 5 och 6.

$$\alpha_{[ov]} = \frac{\sigma_{lv}}{\sigma_{ov}} \alpha \quad (5)$$

$$\alpha_{[lo]} = \frac{\sigma_{lv}}{\sigma_{lo}} \alpha \quad (6)$$

Parametern N behöver inte skalas om eftersom den enbart är associerad till porstorleksfördelningen som genom att anta att jorden varken sväller eller krymper kan sättas konstant.

3.1.4 Relativ permeabilitet

Permeabilitet är ett mått på genomtränglighet av en vätska eller gas i jorden (Fagerström & Wiesel, 1975). Den mäts då hela porvolymen i jorden är fylld av en vätska, dvs. vid mättade förhållanden och är oberoende av väsketyper. Vid stationärt flöde av olja och vatten är porutrymmet i jorden mättat av två separerade faser. För att kunna uppskatta hur respektive vätska flödar under dessa förhållanden används begreppet relativ permeabilitet. Det är kvoten mellan permeabiliteten för en given vätskemättnad, t.ex. 50 % vatten och 50 % olja, och permeabiliteten för jorden. Det finns därför en relativ permeabilitet för både vatten och olja (Fetter, 1999).

Den icke-reducerbara vätskemättnaden definieras som den vätskehalt där den relativa permeabiliteten är noll. Då hålls vätskan främst av kapillära krafter och kan inte flöda i porutrymmet. Den icke-reducerbara vätskemättnaden för olja är därmed den halt som måste uppnås i porutrymmet för att det ska uppstå ett flöde. Detsamma gäller för den icke-reducerbara vätskemättnaden för vatten.

Även om petroleumproduktens relativa permeabilitet i jorden för olika mätnader kan mätas i ett laboratorium görs det sällan på grund av experimentets komplexitet och kostnad. Istället används modeller för att relatera den relativa permeabiliteten till porstorlekar (API, 2007). De två vanligaste har utvecklats av Mualem (1976) och Burdine (1953).

3.2 Olja och grundvattenbrunnar

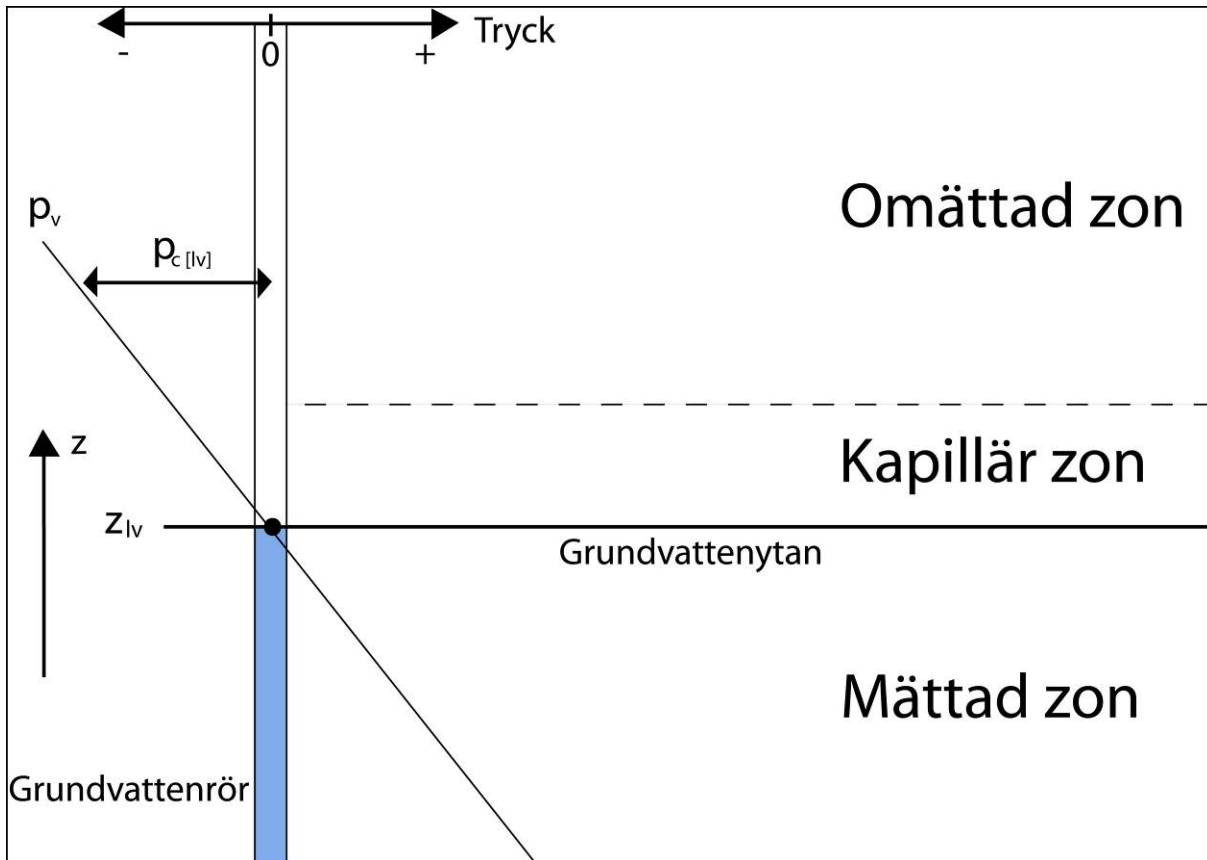
3.2.1 Allmänt

För att avgöra om olja i fri fas finns närvarande ovanpå grundvattenytan kan grundvattenbrunnar installeras i marken. De utgörs av plaströr som förses med filter (perforering) i den zon där grundvattenytan fluktuerar. Olja och vatten kan då rinna till och efter ett tag är vätskorna i brunnen och jordlagret i jämvikt. Den ackumulerade oljan i brunnen kan mätas m.h.a. av ett tvåfaslod, men på grund av kapillär- och gravitationskrafter är inte oljeskiktets tjocklek densamma i jordlagret.

Under hydrostatiska förhållanden (dvs. under förhållanden då tryckskillnader på grund av flödet är försumbara) går det dock att relatera oljeskiktet i grundvattenbrunnen till oljans fördelning i marken. Lenhard och Parker (1990) utvecklade en metod för att uppskatta mängd mobil olja i marken utifrån mätningar i grundvattenbrunnar. Denna metod baserades på uppmätt oljeskikt i brunn, typ av oljeförening och markens retentionsegenskaper, vilket ofta beskrivs genom pF-kurvor (figur 7). Detta koncept är utgångspunkten för de flesta modeller som används idag, bl.a. API:s LNAPL Liquid and Distribution Model som används i denna undersökning. Modellen beskrivs i avsnitt 4.2.

3.2.2 Distribution av tryck i markprofilen

Vid en traditionell uppdelning av markprofilen är grundvattenytan en gräns mellan mättad och omättad zon. Finns fri fas olja ovanpå grundvattnet är nödvändigt att införa en tredje zon, kapillärzonen (se figur 8). I denna zon är porsystemet näst intill mättat av vatten som hålls av kapillära krafter. Eftersom kapillaritet är omvänt proportionellt mot porstorlek är denna zon mer utbredd i en finkornig jord än i en grovkornig (Fagerström & Wiesel, 1972).



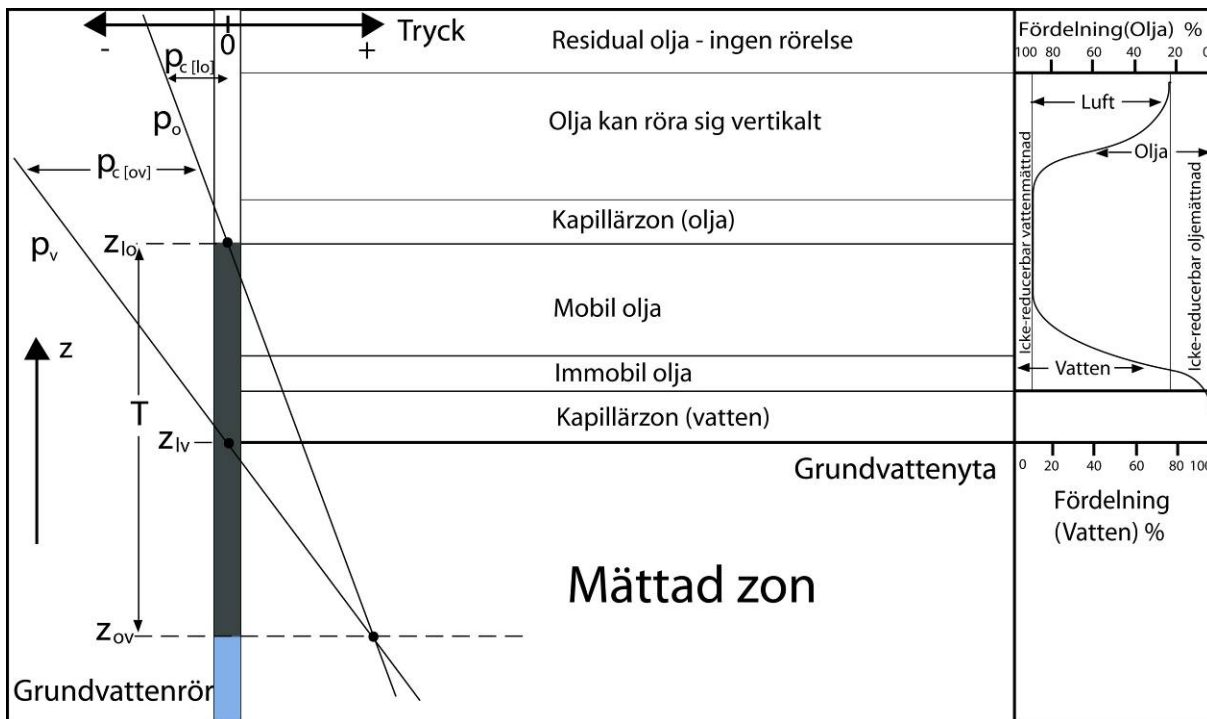
Figur 8 – Markprofilens uppdelning och tryckfördelning (p) i oförorenad jord. Suffixen l, och v står för luft respektive vatten. z är höjd från referensyta och p_c är kapillärtryck.

Under hydrostatiska förhållanden varierar olje- och vattentrycket i markprofilen enligt den hydrostatiska tryckekvationen. Dess samband uttrycker en balans av tryck (p) och gravitationskrafter och ges enligt följande:

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g \quad (7)$$

Figur 8 visar även vattnets tryckdistribution (p_v) i markprofilen. Kapillärtrycket mellan luft och vatten ($p_{c[lv]}$) definieras av vattentryckets absolutbelopp i godtycklig punkt ovanför en referensyta.

När utsläppt olja i fri fas möter det kapillärt bundna vattnet i kapillärzonen bromsas dess framfart. I denna gränsszon, där olja och vatten utgör porutrymmet, avgör olje- och vattenmättnaden fasernas mobilitet. Där den icke-reducerbara vätskemättnaden understigs är respektive vätska immobil. Detta resulterar i en immobil zon) där olja och vatten inte kan röra sig. Ovanför den immobila zonen är den icke-reducerbara vätskemättnaden uppnådd och olja i fri fas är mobil (se figur 9).



Figur 9 - Markprofilens uppdelning och tryckfördelning i en förorenad jord av olja i fri fas. Suffixen l, o och v står för luft, olja respektive vatten. T är uppmätt oljetjocklek i brunnen, z är höjd över en referensyta, p_c och p är kapillärtryck respektive vätsketryck. Modifierats från API (2007) och Fetter (1999).

Om en grundvattenbrunn installeras i markprofilen kan olja i den mobila zonen rinna till. Brunnen, som saknar kapillära egenskaper, agerar som en sänkningstratt av den mobila fasen och ackumulation i brunnen sker till dess att vätskesystemet återigen är i jämvikt. Denna inställer sig då grundvattnet i röret sänkts av för att kompensera för oljans tyngd i röret samt överkanten av oljan når upp till den mobila zonen överkant (Charbeneau, 2000). Denna jämvikt är utgångspunkten för att kunna uppskatta oljans distribution i marken utifrån observerat oljeskikt i brunn.

Den procentuella skillnaden mellan oljeskiktet som observeras i brunnen och det verkliga ovanpå grundvattenytan är större i jordar där den fria fasen utgörs av en tunn film. Vid mäktiga oljeskikt slås de kapillära krafterna ut av högt oljetryck vilket minskar den kapillära zonen (Fetter, 1999).

I en förorenad jord ser vätsketrycksfördelningen annorlunda ut än i en ren (se figur 9). Vattentrycket är fortfarande noll vid grundvattenytan men ackumulation av olja har tryckt ner grundvattnet i brunnen och resulterat i att den uppmätta grundvattennivån (z_{ov}) inte är densamma som den verkliga (z_{lv}). Vätsketrycket i z_{ov} (för både vatten och olja) beror istället av den uppmätta oljetjockleken (T). Oljetrycket i fasövergången mellan olja och luft (z_{lo}) är dock noll.

Vid hydrostatiska förhållanden är vätskeenergin i och utanför brunnen lika. Det resulterar i att följande samband kan härledas:

$$z_{lv} - z_{ov} = \rho_r T \quad (8)$$

$$z_{lo} = z_{lv} + (1 - \rho_r)T \quad (9)$$

där $\rho_r = \frac{\rho_o}{\rho_v}$ = kvoten mellan vatten och oljas densitet.

Eftersom grundvattenytan är ett naturligt föroreningsstopp av olja i fri fas är speciellt ekvation 9 intressant eftersom den relaterar grundvattenytans verkliga läge till uppmätt oljetjocklek under hydrostatiska förhållanden (API, 2007).

3.2.3 Oljans distribution i markprofilen

Hur kapillärtrycket $p_{c[ov]}$ och $p_{c[lo]}$ varierar i markprofilen illustreras i figur 9.

Tryckpotentialen, h_{ov} respektive h_{lo} , i en godtycklig punkt (z) definieras enligt sambanden:

$$h_{ov} = \frac{p_{c[ov]}}{\rho_v g} = (1 - \rho_r)(z - z_{ov}) \quad (10)$$

$$h_{lo} = \frac{p_{c[lo]}}{\rho_v g} = \rho_r (z - z_{lo}) \quad (11)$$

där z_{lo} och z_{ov} tillåts agera referensytor eftersom respektive kapillärtryck där är noll (API, 2007).

Nedanför z_{lo} är porutrymmet mättat av olja och vatten. Vattnets distribution i denna zon kan beräknas genom att sätta in ekvation 5 och 10 i ekvation 3. Den effektiva vattenmättnaden, $S_{e[v]}$, i zonen z_{ov} till z_{lo} , ges då av ekvation 12:

$$S_{e[v]} = \left(1 + \left(\frac{\sigma_{lv}}{\sigma_{ov}} \alpha (1 - \rho_r)(z - z_{ov})\right)^N\right)^{-M} \quad (12)$$

Den effektiva mättnaden beror av residualmättnaderna S_{vr} och S_{or} enligt sambandet.

$$S_{e[v]} = \frac{S_v - S_{vr}}{1 - S_v - S_{or}} \quad (13)$$

Då ges vattenmättnaden av:

$$S_v = S_{vr} + (1 - S_{vr} - S_{or})S_{e[v]} \quad (14)$$

Eftersom porutrymmet endast utgörs av olja och vatten i denna del av markprofilen kan oljemättnaden S_o beräknas enligt:

$$S_o = 1 - S_v \quad (15)$$

Ovanför z_{lo} utgörs porutrymmet av olja, luft och residualt vatten. Den totala vätskefördelningen kan beräknas genom att sätta in ekvation 6 och 11 i ekvation 3. Den totala vattenmättnaden, $S_{e[t]}$, definieras då i zonen z_{ol} upp till markytan av ekvation 16.

$$S_{e[t]} = \left(1 + \left(\frac{\sigma_{lv}}{\sigma_{lo}} \alpha \rho_r (z - z_{lo})\right)^N\right)^{-M} \quad (16)$$

Den totala väskemättnaden definieras enligt:

$$S_{e[v]} = \frac{S_v + S_o - S_{vr} - S_{or}}{1 - S_{vr} - S_{or}} \quad (17)$$

Skillnaden mellan total väskemättnad och vattenmättnad är då:

$$S_{e[t]} - S_{e[v]} = \frac{S_o - S_{or}}{1 - S_{vr} - S_{or}} \quad (18)$$

Därmed ges oljemättnaden av:

$$S_o = S_{or} + (1 - S_{vr} - S_{or})(S_{e[t]} - S_{e[v]}) \quad (19)$$

3.2.4 Beräkning av specifik volym olja i fri fas

Den totala mängden olja i fri fas i kan beräknas utifrån fördelningen av olja i marken (se ekvation 15 och 19). Integration av oljans mättnadskurva över hela markprofilen och multiplicering med jordlagrets porositet genererar en specifik volym. Den anges i meter och motsvarar volym per ytenhet (m^3 / m^2).

Fractionen mobil olja, tillgänglig vid in-situ sanering, kan beräknas utifrån den s.k. residualmättnadsfördelningen. Den kan uppskattas utifrån tabellerade värden över olika jordarters residualmättnad och kan sättas konstant eller varierande i jordprofilen. Den mobila specifika volymen utgörs av den fraktion som innesluts av total- och residualmättnadsfördelningarna.

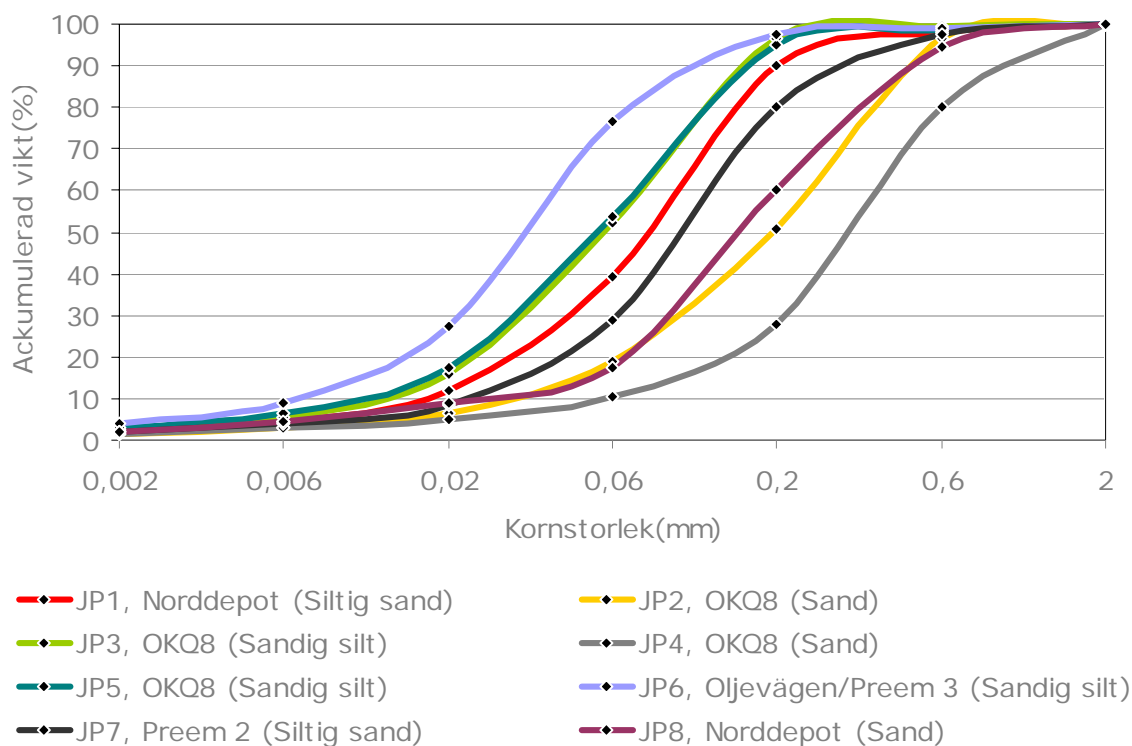
4. UTFÖRANDE

API:s LNAPL Distribution and Recovery Model (API, 2007) användes för att uppskatta sambandet mellan uppmätt oljeskikt i grundvattenbrunn och verklig föroreningsmängd i mark. Modellens parametrar uppskattades genom att jämföra resultat från provtagning, utförd inom ramen för studien, med API:s databas över oljekontaminerade jordar (API, 2006) samt litteraturdata. De framtagna sambanden användes sedan för att uppskatta den totala mängden olja i mark inom Sundsvalls oljehamn och dess förändring över tid. Det utfördes genom programmering i ArcGIS samt visualiserades i bilder och i en animation.

4.1 Provtagning

4.1.1 Provtagning av jord

Provtagning med borrhavn (skruv) utfördes i maj 2007 på sex olika platser inom Sundsvalls oljehamn. Syftet var att hitta representativa jordprover från marklager där den fria fasen fluktuerar samt verifiera jordlagerföljden från tidigare markundersökningar. Åtta stycken jordprover valdes ut och skickades till Sveriges Lantbruksuniversitet laboratorium för kornstorleksanalys. Resultatet visas i figur 10.



Figur 10 – Kornstorleksfördelning av JP1-JP8, klassificering av jordart enligt Svenska Geotekniska föreningen (SGF, 1984).

Klassificering (SGF, 1984) visar att den fria fasen ligger i sandig silt, siltig sand eller sand. Se bilaga 2 för provtagningskarta och provtagningsprotokoll samt bilaga 3 för analysresultat. Ambitionen fanns att ta fram pF-kurvor för de tre skilda jordarterna, men då samtliga jordprover var kraftigt förorenade av olja kunde detta inte genomföras. Enligt laboratoriet på SLU är det mycket svårt att få bort olja från finkorniga jordarter. Laboratorieutrustningen skulle därför kunna ta stor skada. Andra laboratorier tillfrågades men på grund av höga

kostnader alternativt oklarhet i genomförandet av förorenade jordprover avstods detta. Istället togs pF-kurvor fram för jordarterna utifrån deras kornstorleksfördelning (se avsnitt 4.2.1).

4.1.2 Provtagning av olja

För att kunna uppskatta skillnader i typ av oljeförening mellan depåområden togs samlingsprover där olja i fri fas fanns tillgänglig. Det utfördes i samband med jordprovtagningen och provpunkternas lägen redovisas i bilaga 2. Eftersom oljans densitet kan ge en indikation om typ av oljeförening mättes denna. Det amerikanska petroleuminstitutet har utvecklat ett klassificeringssystem för olja baserat på dess densitet. Där ges variabeln °API av sambandet:

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141}{\rho_r} - 135.5 \quad (20)$$

där $\rho_r = \frac{\rho_o}{\rho_v}$ = kvoten mellan densiteten för olja och vatten

Densiteten samt API-graderingen för de olika oljeprovorna (OP1-OP3) visas i tabell 1.

Tabell 1 Resultat från densitetsbestämning

Prov	Område	Brunnar	Densitet(g/ml)	°API *	Typ
OP1	Norddepot	N15, NB55	0,86	28,61	Lätt paraffinolja
OP2	Preem 3/ Oljevägen	P100	0,75	54,01	Bensin
OP3	OKQ8	O3, O19	0,81	40,28	Diesel

* °API = 141/ ρ_r -135.5 där ρ_r är olja-till-vatten-kvoten ($\rho_r = \rho_o / \rho_v$)

Enligt API- skalan motsvaras provet taget inom OKQ8 (OP3) av diesel och Preem3/Oljevägen(OP2) av bensin. Detta är i linje med vad tidigare analyser visat (se avsnitt 2.5)

Densiteten hos oljeprovet från Norddepot (OP1) motsvaras på API-skalan av lätt paraffinolja, ett mindre visköst och tyngre petroleumkolväte än bensin och diesel. Troligtvis är oljan inom Norddepot en sammansättning av flera petroleumkolväten, varför klassificeringen kan vara missvisande. Flampunktstester av olja från Norddepot och Preem 2 indikerar att sammansättningen av oljan inom område är densamma. Därför är det troligt att det tyngre kolväte som finns på Norddepot är samma nedbrutna dieselförening som påträffats på närbelägna Preem 2.

4.2. LDRM och relation mellan observation i brunn och volym i mark

Det amerikanska petroleuminstitutets LNAPL Distribution and Recovery Model (LDRM; API, 2007) användes för att relatera uppmätt oljeskikt i grundvattenbrunn till föroreningsmängd i mark. Dess programvara finns tillgänglig på API:s hemsida (www.api.org/lnapl). De modellparametrar som måste bestämmas var följande: --- retentionsegenskaper i egenskap av van- Genuchten parameterisering, jordens porositet och residualmättnad samt oljeföreningens ytspänning och densitet. LDRM ger även utrymme för att kunna utvärdera effektivitet hos olika saneringstekniker. Då krävs ytterligare information om jordlagrens permeabilitet och oljans viskositet.

4.2.1 Modellens jordparametrar

Retentionsegenskaperna hos sandig silt, siltig sand och sand - jordartesintervallet som tagits fram genom provtagning (se avsnitt 4.1.1) - uppskattades med hjälp av det amerikanska petroleuminstitutets databas över oljekontaminerad jord (API, 2006). Där finns utförliga analyser av förorenade jordprover med avseende på kornstorlek, retentionsegenskaper, permeabilitet, residualmättnad etc. Genom att matcha kornstorleksfördelningen för silt, siltig sand och sand med prover från databasen kunde representativa analysprotokoll fås fram. I dem är retentionsegenskaperna representerade enligt van Genuchten's parameterisering av pF-kurvan (se avsnitt 3.1.3). Den används av LDRM och redovisas för de tre jordarterna i tabell 2 tillsammans med uppskattad residualmättnad och porositet. Residualmättnaden sattes utifrån vad som rekommenderas i modellhandboken (API, 2007). Porositeten sattes till 40 % eftersom det var i den storleksordningen medelporositeten var för jordproven som användes i databasen.

Tabell 2 - van Genuchten parameterisering av sandig silt, siltig sand och sand.

Jordtyp	α (m^{-1})	N	Residualmättnad	Porositet
Sandig silt	2,0	2,1	0,3	0,4
Siltig sand	4,0	2,2	0,3	0,4
Sand	8,0	2,4	0,3	0,4

4.2.2 Modellens föroreningsparametrar

Modellens ytspänningskoefficienter uppskattades utifrån tabellerade värden (Charbeneau, 2000). Dessa anges för olika °API (se avsnitt 4.1.24.1.2 Provtagning av olja) och visas i tabell 3.

Tabell 3 - Modellparametrar för olika typer oljeföroreningar

Föroreningstyp	Densitet	°API *	Ytspänning (luft/vatten)	Ytspänning(olja/vatten)
Nedbruten diesel	0,86	28,61	50	25
Diesel	0,81	40,28	50	25
Bensin	0,75	54,01	50	21

* °API = $141/\rho_r - 135,5$, där ρ_r är olja-till-vatten-kvot ($\rho_r = \rho_o/\rho_v$). Gradering utvecklat av det amerikanska petroleuminstitutet (API).

4.2.3 Framtagning av samband för olika föroreningssituationer

Genom att kombinera de framtagna föroreningstyperna och jordarterna kunde nio stycken olika föroreningssituationer bildas. Eftersom den fria fasen tycks fluktuera i två jordlager (sand och sandig silt) inne på OKQ8:s depåområde ansågs det även intressant att simulera denna. De totalt tio olika föroreningssituationerna är redovisade i tabell 4.

Tabell 4 – Kombinationer av jordart och föroreningstyp

Jordart	Produkt
Sandig silt	Bensin
Sandig silt	Diesel
Sandig silt	Nedbruten diesel
Siltig sand	Bensin
Siltig sand	Diesel
Siltig sand	Nedbruten diesel
Sand	Bensin
Sand	Diesel
Sand	Nedbruten diesel
Sandskikt i sandig silt	Diesel

Programvaran för LDRM användes för att ta fram samband mellan det observerade oljeskiktet i brunn och specifik volym i mark för samtliga föroreningssituationer. Inför varje ny simulering sattes uppskattade variabler in i modellen varefter den genererade resultat i form specifik volym i mark för olika brunnobservationer.

4.3 Uppskattning av oljevolym i mark och dess förändring över tid

4.3.1. Observationer

Observationer av oljeskikt i grundvattenbrunnar utgjorde grunddata för att kunna uppskatta den totala mängden fri fas olja i marken. Dessa sammanställdes från kontroll- och saneringsprogrammets internrapportering som skickats till Golder under årens lopp. Kontinuiteten i rapportering skiljer sig beroende på vilket program den tillhör. Brunnar som ingår i kontrollprogrammet, drygt 100 stycken, pejlas varannan månad av hamnpersonal. Där används data från januari 2002 till september 2007. Övriga grundvattenbrunnar, uppskattningsvis 180 stycken, pejlas av Däldehög i samband med varje ny mobilisering av saneringsanläggningar. Dessa flyttas ständigt runt inom saneringsområdet vilket göra att pejlingsintervallet för varje brunn är mycket oregelbundet. Det totala antalet observationer var 8399 stycken fördelade på 273 brunnar. En kvalitetskontroll gjordes där orealistiska observationer togs bort (t.ex. ”negativ” oljetjocklek).

För att kunna få fram representativa värden under perioder där ingen grundvattenpejling gjorts antogs ett linjärt samband föreligga mellan två observationer i rad i samma brunn. Detta angreppssätt valdes främst av två anledningar:

- Det är en konservativ uppskattning. Den uppskattade observationen är inte en grov överskattning eller underskattning av den verkliga observationen. Det är fördelaktigt eftersom huvudsyftet är att se tendenser i markens oljevolymförändring över tid.
- Det är okomplicerat. Det är inte säkert att mer komplexa angreppssätt som numeriska metoder eller andragradspolynomer uppskattar observationen bättre eftersom oljeskiktet fluktuerar mycket oregelbundet och med stora variationer.

4.3.2 Uppskattning av oljevolymin i marken inom hamnområdet

För att kunna uppskatta volymen av fri fas olja i marken inom hamnområdet relaterades samtliga observationer av oljeskiktet i grundvattenbrunnarna till sambanden framtagna i avsnitt 4.2.3. Det gjordes genom att kategorisera brunnarna utifrån vilken förorening som finns i dem samt vilken typ av jord som de är installerade i. För att kunna få fram specifik volym för en godtycklig observation användes andragradspolynomen som anpassats till sambanden.

Den totala volymen olja inom hamnen och dess mobila fraktion kunde beräknas för varje dag med hjälp av programvaran ArcGIS 9.2. Följande arbetsschema användes:

1. Inläsning av data för total och mobil specifik oljevolymin för alla brunnar för vald dag.
2. Framtagning av oljeskikt (raster) genom Nearest Neighbour-interpolation.
3. Integrering av oljeskikt ovanför referensyta ($z=0$) för att få fram total och mobil volym inom hamnen.
4. Uppdelning av oljeskiktet genom rastermultiplikation. Varje depåområde får sitt eget oljeskikt.
5. Integrering av depåområdenas oljeskikt för att få fram total och mobil volym inne på varje depåområde
6. Rendering av bild som visar föroreningssituationen

Eftersom antalet tidssteg är stort (över 2000 dagar) och varje volymuppskattning en tidskrävande process, programmerades ett Visual Basic Script för ArcGIS som automatiserade processen.

4.4 Spridning av olja

Eventuella spridningsmönster kunde identifieras genom att analysera oljevolymförändringen samt de bilder som interpolationen genererat. Analys av de senare gjordes genom att bilda en animation där oljevolymens förändring kunde ses. Animationen gjordes i ArcGIS och sparades i avi-format. Länk till animationen finns att återfå i resultatdelen.

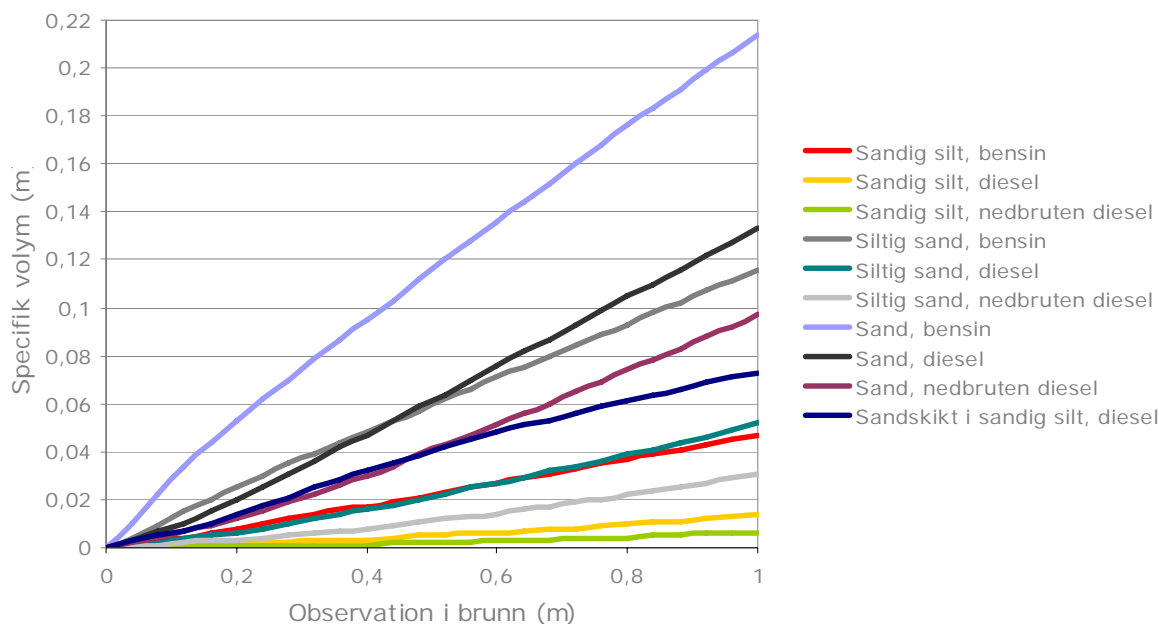
5. RESULTAT

5.1 Relation mellan oljeskikt i brunn och volym olja i mark

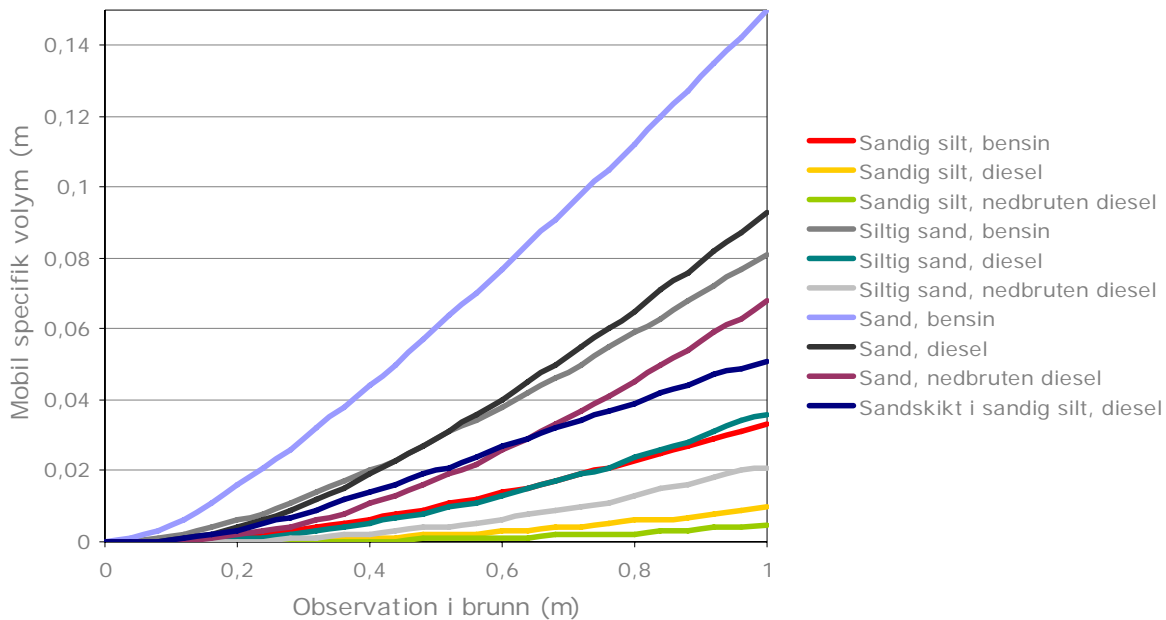
Modelleringsresultaten visar att sambandet mellan observerat oljeskikt i en grundvattenbrunn och den verkliga föroreningsmängden i marken beror av markens kapillära egenskaper och typ av oljeförorening. Figur 11 visar sambanden för de tio olika föroreningsituationer som undersökts. Det är där uppenbart att den specifika volymen av olja minskar med finkornigare jordlager. Exempelvis skiljer sig uppskattad volym olja i mark i sandig silt och sand med en faktor 4 vid exakt samma brunnobservation av 1 m bensin. Det är också tydligt att oljeföroreningens sammansättning har en stor inverkan. Den uppskattade specifika volymen i ett sandlager är densamma för 1 m nedbruten diesel och 0.5 m bensin. Det är speciellt intressant i fallet Sundsvall oljehamn eftersom observationer av det slaget och i den storleksordningen är mycket återkommande.

Figur 12 visar sambandet mellan observation i brunn och mobil specifik volym i mark. Där antar relationen inte som tidigare ett linjärt samband utan är snarare av exponentiell art. Det innebär att den procentuella skillnaden mellan observation i brunn och mobil specifik volym är större för små observationer. Det tycks även som om den specifika mobila volymen för täta jordarter är nära noll för observationer upp till 0.5 m.

I en jämförelse mellan extremfallen sandig silt med nedbruten diesel och sand med bensin skiljer sig den mobila specifika volymen med ca en faktor 30 vid samma observation i brunnen (1 m). Marken innehåller i det fallet ca 4.5 liter nedbruten diesel per kvadratmeter respektive 150 liter bensin per kvadratmeter.



Figur 11 – Samband mellan observation i brunn och specifik volym olja i mark för tio stycken olika föroreningsituationer framtagna med hjälp av API:s LDRM. Specifik volym =m³/m².



Figur 12 - Samband mellan observation i brunn och mobil specifik volym olja i mark för tio stycken olika föroreningsituationer framtagna med hjälp av API:s LDRM. Specifik volym =m³/m²

5.2 Mängd olja i marken före saneringen

Den totala mängden fri fas olja inom hamnområdet före saneringen uppskattas varit 300 kubikmeter. Av denna volym uppskattas 162 kubikmeter ha utgjorts av mobil fas och därmed tillgänglig för sanering. Dessa volymer är visualiserade i figur 13 och figur 14. Tre kraftigare oljeskikt kan identifieras (presenterade i minskad storlek). Det första breder ut sig i de centrala och södra delarna av OKQ8 och sträcker sig in på Minneslunden. Oljan utgörs troligtvis av diesel med låg grad av nedbrytning med liten inblandning av bensin. Det andra breder ut sig i området kring järnvägsutlastningen (Oljevägen) mellan Preem 3 och OKQ8. Oljan utgörs troligtvis av bensin med låg grad av nedbrytning. Det tredje breder ut sig inom stora delar av Norddepot och i de norra delarna av Preem 2. Oljan utgörs troligtvis av nedbruten diesel med inslag av tjockolja.

Oljans sammansättning och förekomst inom hamnens olika delområden presenteras i tabell 5. Områdesuppdelning av företaget redovisas bilaga 1.

Tabell 5 – Total och mobil mängd förorening inom respektive depåområde före saneringen.

Depåområde	Förorening	Total mängd (m ³)	Mobil mängd (m ³)
Norddepot	Nedbruten diesel	40	21
OKQ8	Diesel	184	95
Minneslunden	Diesel	2	1
Preem 2	Nedbruten diesel	13	8
Preem 3	Bensin	8	5
Oljevägen	Bensin	35	25
Statoil	Bensin/Jet A1	18	8



Figur 13 - Uppskattning av olja inom Sundsvalls oljehamn sommaren 2004 innan saneringen inleddes. Kartan illustrerar utbredningen av de 300 kubikmeter olja i fri fas som uppskattas ha funnits. Kartan är framtagen i enlighet med avsnitt 4.3.2.

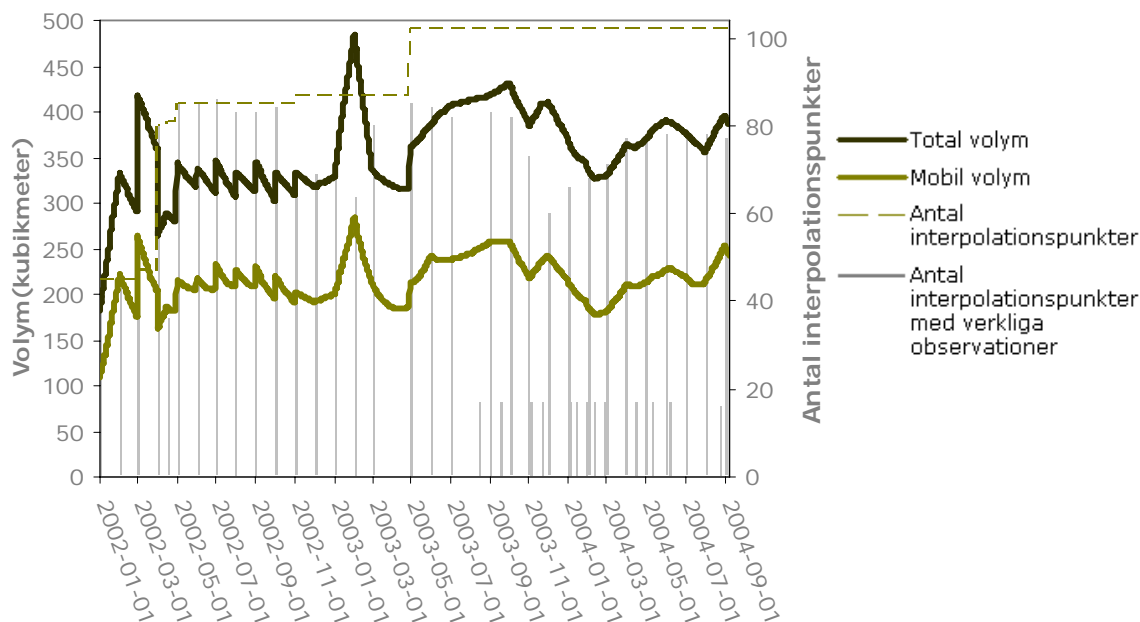


Figur 14 - Uppskattning av mobil olja inom Sundsvalls oljehamn sommaren 2004 innan saneringen inleddes. Kartan illustrerar utbredningen av de 162 kubikmeter mobil olja i fri fas som uppskattats ha funnits. Kartan är framtagen i enlighet med avsnitt 4.3.2.

5.3 Oljevolymförändring

5.3.1 Före sanering

Förändring av den totala oljevolymen inom hamnområdet före saneringsprojektets start (januari 2002 – september 2004) visas i figur 15.

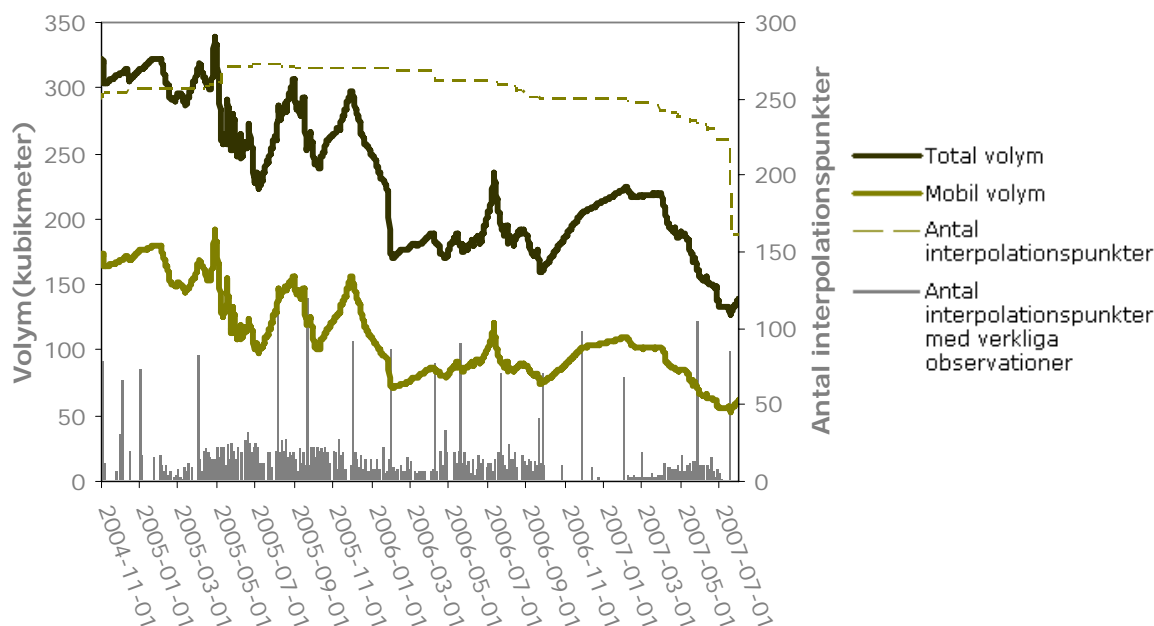


Figur 15 - Förändring av oljevolym inom hela hamnområdet före saneringen (januari 2002 – september 2004). Den totala och mobila volymförändringen visas i den övre respektive nedre kurvan. För varje dag presenteras även antalet interpolationspunkter (antal grundvattenbrunnar) som uppskattningen baseras på i form av den streckade linjen. Andelen verkliga observationer i interpolationspunkterna redovisas i form av staplar. Det maximala antalet interpolationspunkter är 104 stycken.

Under de år som föregick saneringen (2002-2004) uppskattas den mobila oljevolymen i marken fluktuerat mellan 200-250 kubikmeter. På grund av stor osäkerhet i interpolationen bör uppskattningen tas med tillförsiktighet. Antalet interpolationspunkter, och således brunnar, är kraftigt reducerat jämfört med uppskattningen som gjorts under saneringsfasen (se avsnitt 5.3.2). Det beror på att denna uppskattning endast tagit med de grundvattenbrunnar som ingår i hamnens kontrollprogram och inte i saneringsprogrammet. Det förklarar även att uppskattningen av oljevolymen i september 2004 (se figur 15) inte är i samma storleksordning som november 2004 (se figur 16). Fluktuationen av den mobila volymen före saneringen beror troligtvis av grundvattnets naturliga variation. Topparna i diagrammet skulle kunna förklaras av utsläpp/läckage av olja. .

5.3.2 Under sanering

Förändring av den totala och mobila oljevolymen under saneringen presenteras i figur 16. Uppskattningsvis har initialvolymen på 162 kubikmeter mobil minskat med 60 %. Det motsvaras av en minskning på 80-90 kubikmeter olja. För att kunna uppskatta minskningens geografiska ursprung analyserades även förändringen för hamnens depåområden enskilt (se bilaga 5). En sammanställning av resultatet presenteras i tabell 6. Den största procentuella minskningen har skett inne på OKQ8s depåområde samt under Oljevägen. Det enda delområde där markvolymen tycks ha ökat är Minneslunden. Denna iakttagelse diskuteras vidare i avsnitt 5.4.



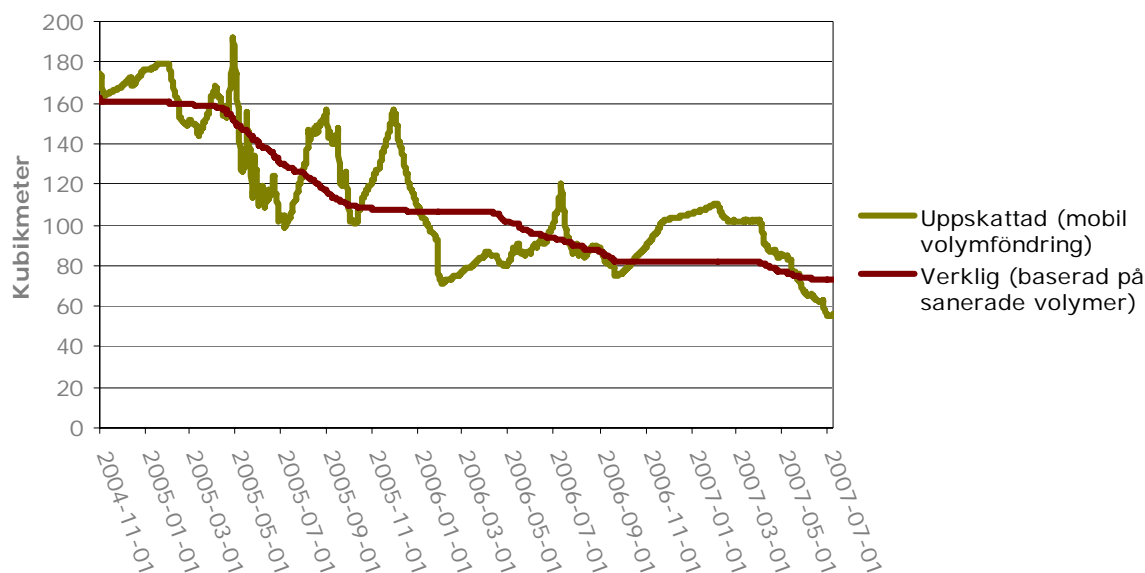
Figur 16 - Förändring av oljevolym inom hela hamnområdet under saneringen (november 2004 – juli 2007). Den totala och mobila volymförändringen visas i den övre respektive nedre kurvan. För varje dag presenteras även antalet interpolationspunkter (antal grundvattenbrunnar) som uppskattningen baseras på i form av den streckade linjen. Andelen verkliga observationer i interpolationspunkterna redovisas i form av staplar. Det maximala antalet interpolationspunkter är 273 stycken.

Tabell 6 – Oljevolymförändring oktober 2004 till juli 2007 och kvarvarande volym olja i juli 2007

Depåområde	Förändring (m ³)	Kvarvarande mängd (m ³)
Norddepot	-13	7
OKQ8	-50	40-50
Minneslunden	+ 5-10	5-10
Preem 2	-5	3
Preem 3	-5	1
Oljevägen	-23	5
Statoil	-5	1

5.3.3 Validering av metod

Ett sätt att validera den valda uppskattningsmetoden är att jämföra dess resultat med de sanerade oljevolymer som entreprenören inrapporterat. Den uppumpande oljan bör då återspeglas i motsvarande minskning i mobil volym. Denna typ av jämförelse återges i figur 17.



Figur 17 – Jämförelse mellan uppskattad och verklig volymförändring under saneringen. Den verkliga mängden är initialmängd (162 kubikmeter) som beräknats enligt avsnitt 5.2 minus upptagen volym olja.

Den prediktiva kurvan över den mobila volymens förändring följer saneringsresultatet på ett relativt tillfredsställande sätt. De påtagliga skillnaderna kan härledas till perioder där mätningar av oljeskikten i grundvattenbrunnarna utförts utan att marksystemet varit i jämvikt. Då blir den beräknade oljevolymer mindre än i verkligheten. I de perioder då saneringen varit inaktiv eller minimal, exempelvis vintertid, sker en fullständig återhämtning av marksystemet och tillgänglig olja kan rinna till. Det gör att det ser ut som den mobila oljevolymer ökar. Det är viktigt att komma ihåg att valideringen inte tar hänsyn till om initialvolymen är korrekt utan ger bara en uppskattning om säkerheten i förändringens storlek.

5.4 Spridning av olja

Med hjälp av den animation som skapats i ArcGIS går det att visuellt bekräfta att de större oljeskikten inom respektive område inte migrerat. Det har istället minskat på plats. Det enda som tyder på att olja rör sig är ökningen som skett inom Minneslunden. Detta kan både bekräftas visuellt i animationen, i tabell 6 samt i diagrammet över oljevolymerförändringen inom Minneslunden som återfinns i bilaga 5. Animationen finns att ladda ned på <http://loefgren.se/exjobb/animation.avi>.

6. DISKUSSION

6.1 Relation mellan oljeskikt i brunn och volym olja i mark

De framtagna teoretiska sambanden visar på en stor skillnad mellan observerat oljeskikt i grundvattenbrunn och mängd oljeförening i mark, särskilt i täta jordlager med tyngre petroleumföreningar. Det kan förklara en del av de problem som uppstått i samband med grundvattensaneringsarbetet inom Sundsvalls oljehamn.

Stora skillnader i uppfodringshastighet, uppumpad olja per drifttimme och brunn, har varit ett återkommande huvudbry för samtliga inblandade i projektet. Exempelvis är uppfodringshastigheten inom Norddepot 1,7 liter per timme och under Oljevägen 5,7 liter per timme i medel under 2004-2007. Det är fallet även om markförhållanden och observationer gjorda i grundvattenbrunnar indikerar att uppfodringshastigheten bör vara densamma. Förklaringen ligger i att depåområdena har olika typer av oljeföreningar. Observationer av den nedbrutna diesel i grundvattenbrunnar inom Norddepot motsvaras av mycket små specifika volymer i marken. Det innebär att oljeskiktet inom Norddepot är mycket tunnare än vad man tidigare trott. Enligt sambanden är den specifika volymen som störst under Oljevägen och inom OKQ8:s depåområde. Det innebär oljeskiktet är som störst där, vilket återspeglas i höga uppfodringshastigheter.

De framtagna sambanden kan även förklara de exceptionellt stora observationerna (upp till 3,5 meter) som gjordes i grundvattenbrunnar i de östra delarna av Norddepot under 2005. Mätningar i den storleksordningen har aldrig tidigare gjorts inom hamnområdet och man kunde då ha misstänkt ett utsläpp i större skala. Saneringsframgångarna inom det specifika området var däremot knappt förändrade. Det kan förklaras av att de största skillnaderna mellan observation i grundvattenbrunn och föreningsmängd i mark är som störst just i de östra delarna av Norddepot. Det beror på att jorden där är mycket siltig och oljeföreningen tung (nedbruten diesel). Det som är intressant i sammanhanget är att det ”potentiella utsläppet”, som verkligen uppmärksammandes, motsvarar i verkligheten markkoncentrationer av olja som kontinuerligt och fortfarande idag överskrider på OKQ8 och Preem 3:s depåområden samt under Oljevägen.

6.2 Mängd olja inom Sundsvalls oljehamn före saneringen

Genom teoretiska beräkningar (se avsnitt 5.2) uppskattades den totala mängden fri fas olja inom hamnen före saneringen till 300 kubikmeter. Det är betydligt mindre än vad man tidigare trott fanns i området. Statens Geotekniska Institut (SGI) uppskattade 2001 den totala oljevolymer inom hamnen till 2 000-6 000 kubikmeter (Sundsvalls tidning, 2005). Det motsvarar en oljevolymer minst åtta gånger större än vad som beräknats i denna studie. Tyvärr har ingen information återfunnits om SGI:s uppskattning avser total mängd olja eller total mängd olja i fri fas. Hur dessa volymer förhåller sig till varandra är tämligen osäkert. Däremot är det rimligt att anta att fraktionen olja i fri fas inom hamnen är betydligt större än den fraktion som löst sig i grundvatten eller som är i gasfas.

Ett bristfälligt och inte helt ovanligt sätt att uppskatta utbredning av mobil olja i mark är att låta ackumulerad olja i en grundvattenbrunn motsvara tjockleken av det förorenade jordlagret runt brunnen. Mängd olja i marken skulle då ges av tjockleken av jordlagret multiplicerat med

jordens porositet (för silt och sand ca 40%). En sådan beräkning i ArcGIS skulle resultera i en total mobil volym på 2 400 m³. Det är nästan åtta gånger mer än den mobila volym som uppskattas i denna studie.

Bergrummen, som finns inom stora delar av hamnområdet, har en dränerade effekt på jordlagren kring grundvattenbrunnarna. Det skapar en nedåtriktad hydraulisk gradient i jorden vilket förskjuter jämvikten som inställer sig mellan grundvattenbrunn och jordlager. Det får till följd att grundvattenytan i brunnen sänks som i sin tur resulterar i att en större mängd olja kan ackumuleras i grundvattenbrunnen. Det är därför rimligt att anta att uppskattningar gjorda inom ramen för studien är överskattningar av den verkliga volymen. Det går att simulera en nedåtriktad hydrauliska gradient i LDRM, men då måste först den hydrauliska gradienten bestämmas.

6.3 Oljevolymförändring och uppskattningsmetod

Det är tydligt att saneringen haft god effekt inom hamnen eftersom de teoretiska beräkningarna visar att större delen av den fria fasen olja är borta. Majoriteten av oljevolymminskningen uppskattas ha skett på OKQ8:s depåområde och under Oljevägen. Det är i linje med föregående slutsatser där beräkningar visat att saneringspotentialen är störst inom dessa områden.

De teoretiska beräkningarna som uppskattat saneringspotential, oljevolymförändring osv. baseras på data med osäkerhet som är svår att mäta. Den validering som gjordes, där beräkningar av oljevolymen jämfördes med sanerade oljevolymmer under samma tidsperiod, indikerar dock att tillförlitligheten i uppskattningsmetoden är okej. Eftersom den kunde göras finns det fog att tro att uppskattningsmetoden, kombination av LRDM och ArcGIS, var ett fullgott verktyg. Alternativa metoder så som flerfasmodellering kommer ständigt falla på ovissheten i hur brunnobservationer ska tolkas. Att större delen av arbetet kom att fokusera just detta har resulterat i att föroreningssituationen inom Sundsvalls oljehamn kunnat karläggas på ett bra och vetenskapligt sätt.

Att använda LDRM i initialskedet i andra projekt bör anses som fördelaktigt på många sätt. God kännedom om föroreningssituationen är nödvändig för att kunna bestämma saneringsmetodik, uppskatta saneringskostnader och tidsåtgång. Det bör tilläggas att LDRM kan utvärdera saneringsscenarioer med olika typer av metoder. Även om dessa typer av simuleringar kräver tid och pengar i anspråk lönar det sig säkerligen i slutändan.

Om antagandet, att det finns en nedåtriktad hydraulisk gradient i marken, är korrekt kan beräkningarna gjorda inom ramen för denna studie vara överskattningar. Det skulle innebära att initialmängden i verkligheten skulle vara mindre samt att oljevolymförändringen och effektiviteten i saneringen större.

6.4 Spridning

Undersökningen indikerar att olja i fri fas i marken ökat inom Minneslunden som avgränsar hamnområdet i sydväst. Detta är oroväckande eftersom området saknar cisterner och bergrumsanläggningar, vilket innebär att olja måste ha spridits till Minneslunden från förorenade områden uppströms. Troligtvis har diesel spridits från OKQ8:s depåområde via grundvattnet. Då jordlagerföljden inom Minneslunden inte verifierats i denna undersökning

finns det en risk för att den uppskattade ökningen av olja inom Minneslunden, 5-10 m³, är en överskattning. Vid beräkningarna antogs hamnområdets utkanter, där få markundersökningar gjorts, ha relativt genomsläppliga jordar. Detta för att observationerna i de områdena inte ska underskattas. Det är dock fortfarande uppenbart att fri fas olja finns i området. Därmed är nedströms recipient, Sundsvallsåsen, i riskzonen. De mätningar som görs kontinuerligt av åsen har dock inte indikerat att föroreningen spridits dit. Spridningstendenserna är dock ett starkt incitament att mobila liksom spridningsbenägna oljevolymer inom OKQ8 och under Oljevägen måste vara i fokus i det fortsatta saneringsarbetet.

6.5 Felkällor

De framtagna sambanden mellan observation i brunn och verklig föroreningsmängd i mark är uppskattningar där osäkerheten är svår att kvantifiera. LDRM bygger på data över markens retentionsegenskaper och i denna studie uppskattades modellens retentionsparametrar genom att jämföra kornstorleksfördelningar mellan prover tagna inom ramen för denna undersökning och API:s databas (API, 2006). Även om ambitionen var att ta fram representativa parametrar för tre stycken olika jordarter, är det osäkert hur väl kornstorleksfördelningen förhåller sig till pF-kurvan. Det finns modeller (Rajkai m.fl, 2006) där man försökt uppskatta denna relation, men de visade sig otillämpbara för sorterade jordar som har ett snävt kornstorleksintervall. För att öka tillförlitligheten skulle pF-kurvor laborativt kunna tas fram för jordprover tagna inom hamnområdet. Den ambitionen fanns men tyvärr visade det sig vara en tämligen komplicerad och tidskrävande process på förorenad jord.

LDRM:s utgångspunkt är att vätskor i grundvattenbrunnar och ute jordlagret är i jämvikt. Detta är tyvärr sällan fallet eftersom grundvattnets naturliga fluktuation ständigt sätter systemet ur balans. Tyvärr finns det ingen vedertagen modell där man tar hänsyn till detta. Pumpning av olja och vatten genom saneringsanläggningarnas vakuumsugar rubbar även marksystemet. De anses inte ha påverkat systemet i någon större skala, eftersom brunnarna pejlats av innan varje brunn kopplas in för sanering. Därmed har marksystemet förhoppningsvis återgått till jämvikt efter det senaste saneringstillfället.

Osäkerheten i varje volymuppskattning kan delvis relateras till antalet observationer den bygger på. Därför är det angivet vid varje oljevolympuppskattning (se figur 15, figur 16 och bilaga 5). Detta gör det möjligt att urskönja perioder där säkerheten i interpolationen är större. Det vill säga där antalet verkliga observationer och det totala antalet interpolationspunkter är högre. Under dessa perioder bör uppskattningen vara mer tillförlitlig. På motsvarande sätt går det att identifiera perioder där saneringen varit inaktiv (inga mätningar) eller minimal vilket ger en uppskattningen med större osäkerhet. Med denna kännedom går det att vikta uppskattningen efter dess tillförlitlighet. Detta har gjorts vid all utvärdering av oljeskiktens förändring inom hamnen.

6.6 Avslutningskriterium och prognos

För att kunna uppskatta när saneringsprojektet kan anses som avslutat är det nödvändigt att ha ett välgrundat och realistiskt avslutningskriterium för projektet. Idag pumpas det olja ur samtliga saneringsbrunnar tills maximalt fem centimeter står kvar i dem. Därefter kan saneringen avbrytas. En observation av fem cm motsvaras dock av distinkt skilda

föroreningsmängder i marken inom hamnområdet. Skillnaden mellan vad som observeras i brunnen och den verkliga markkoncentrationen kan tom uppgå till en faktor 30. Det innebär att avslutningskriteriet kan styra projektet i fel riktning och att man satsar resurser inom områden där det i verkligheten är mycket svårt att sanera oljan. Det i sin tur kan leda till att man underskattar/prioriterar bort områden där saneringspotentialen är stor. Ett tydligt fall av hur det nuvarande avslutningskriteriet slagit fel är Norddepot. Där är observationer på 1-1,5 m vanligt förekommande i några brunnar. Trots stora saneringsinsatser har dock mycket lite olja sugits upp och nivåerna i brunnarna knappt förändrats. Det beror på att det i verkligheten finns mycket lite olja i anslutning till brunnarna. För att kunna avsluta saneringen inom ett sådant område, med täta jordlager och tunga petroleumföroreningar, är det nödvändigt att omdefiniera det nuvarande avslutningskriteriet. Ett nytt avslutningskriterium bör baseras på, ur miljösynpunkt och efter saneringsmetodens begränsningar, acceptabla markkoncentrationer. Ett sådant skulle kunna utarbetas med hjälp av LDRM i kombination med en riskvärdering. Den senare skulle kunna baseras på oljeföroreningens mobilitet och fara för nedströms recipienter. Ett sådant avslutningskriterium skulle även ta hänsyn till sandiga jordlager och flyktiga petroleumföroreningar som återfinns under Oljevägen och inom OKQ8:s depåområde. Fokus skulle då hamna på att få bort olja med god saneringspotential och som utgör en risk för Sundsvallsåsen och miljön.

Trots att det nuvarande avslutningskriteriet gör det svårt att sja om saneringsprojektets framtid är det tydligt att saneringsarbetet haft stor effekt och att det börjar bli svårt att motivera fortsatt sanering med bioslurping. Saneringsanläggningarna börjar få svårt att få upp olja ur brunnarna. Figur 17, som visar uppumpade volymer under saneringen, illustrerar detta. Under "sommarkörningen", dvs då det saneras inom samtliga områden, sögs det upp 50 m³ år 2005, 25 m³ 2006, och 10 m³ 2007. Det är ungefär en 50 % minskning från år till år. Uppskattningsvis skulle då 2008 innebära att ungefär 5 m³ skulle kunna saneras, vilket är extremt lite i förhållande till antalet drifttimmar.

6.7 Förslag till fortsatt mät- och saneringsprogram

Ett förslag till att öka tillförlitligheten i framtida volymuppskattningar är att utöka det nuvarande mätprogrammet. I interrapporteringen till Golder saknas det mätdata över ett flertal brunnar där det inte sanerats på länge. Dessa brunnar, tillsammans med brunnar som redan kontrolleras, bör pejlas med ett definierat tidsintervall; förslagsvis varannan månad med en mätperiod på ett par dagar. Ju kortare mätperiod desto bättre. Då kan uppskattningar av oljeskiktet göras på ett mer tillförlitligt sätt som kan jämföras med andra perioder.

Det amerikanska naturvårdsverket har utarbetat en rapport för beslutstagande vid sanering av oljeförorenade områden (EPA, 2005). Där konstateras det att saneringsförsök allt för ofta baseras på ofullständig eller dålig förståelse för oljans beteende och dess utbredning i marken. Det resulterar i felaktiga beslut i valet av saneringsteknik och efterbehandlingskrav, vilket i sin tur genererar projekt som sträcker sig över mycket lång tid på grund av ouppnåliga saneringsmål. Även om denna studie gett mer information om hur föroreningssituationen ser ut inom Sundsvalls oljehamn finns det fler saker som bör klargöras. Följande är exempel på åtgärder som både skulle göra saneringsarbetet mer effektivt och simuleringar av oljeskikten mer tillförlitliga:

- Kartlägga hur oljans sammansättning varierar inom hamnområdet genom att provta olja. Proverna kan sedan skickas till laboratorium för mätning av densitet och ytspänningsegenskaper.
- Dela in hamnen i områden utifrån markförhållanden och typ av förorening, inte utefter företag. Inom varje nytt delområde kan sedan representativa och ostörda jordprover tas som skickas till laboratorium. Där kan pF-kurvor tas fram och residualmättnad av olja mätas.
- Mäta den nedåtriktade hydrauliska gradienten inom hamnen och uppskatta hur den inverkar på sambandet mellan observerad oljetjocklek i grundvattenbrunn och den verkliga markkoncentrationen.
- Uppskatta föroreningarnas mobilitet och vilken risk de utgör för nedströms recipienter.
- Upprätta avslutningskriterier för olika delområden som baseras på markkoncentrationer, risker för nedströms recipienter och spridningsbenägenhet.

De ovanstående åtgärderna skulle troligtvis styra saneringsprojektet i en ny riktning och med ökad effektivitet där chansen till framtida avslut ökat väsentligt.

7. SLUTSATSER

- Observerat oljeskikt i grundvattenbrunnar motsvarar inte det verkliga i marken. Sambandet beror istället av markens sammansättning samt typ oljeförorening i jordlagret.
- God kunskap om den lokala föroreningsituationen är nödvändig för att kunna tolka grundvattenobservationer i förorenad mark med fri fas olja. Avsaknad av denna kan resultera i överskattning av oljemängden inom områden med täta jordlager och tyngre kolväten samt underskattning inom områden med genomsläppligare jordlager och lättflyktigare kolväten.
- Grundvattensaneringsprojektets avslutningskriterium bör baseras på föroreningsmängd i mark och vilken risk oljeskikten utgör för miljön. Endast då kan saneringsarbetet utföras på ett effektivt och miljömässigt sätt som kan få ett avslut på ett acceptabelt sätt.
- Områden där saneringspotentialen och spridningsbenägenheten är stor bör vara helt i fokus i det framtida saneringsarbetet. Detta för att undvika fortsatt spridning av olja, speciellt från OKQ8 och Oljevägen mot Minneslunden och Sundsvallsåsen.

8. KÄLLFÖRTECKNING

8.1 Litteratur

American Petroleum Institute (API), 2007. *LNAPL Distribution and Recovery Model (LDRM)* Regulatory Analysis and Scientific Affairs Department. American Petroleum Institute, USA

American Petroleum Institute (API), 2006. *Light Non-Aqueous Phase Liquid (LNAPL) Parameters Database*. Regulatory Analysis & Scientific Affairs Department. USA

Ballestero, T.P., F.R. Fiedler och N.E. Kinne, 1994. *An investigation of the relationship between actual and apparent gasoline thickness in a uniform sand aquifer*. Ground water 32, no. 5: 708-718

Burdine, N.T., 1953. *Relative permeability calculations from pore-size data*. Trans. A.I.M.E 198:71-77

Charbeneau, R.J., 2000. *Groundwater Hydraulics and Pollutant Transport*, Prentice Hall. ISBN 0-13-975616-7

EPA, 2005. *A decision-Making Framework for Cleanup of Sites Impacted with LNAPL*. Report 542-R-04-011. Office of Solid Waste and Emergency Response (5102G)

Fagerström, H. och C.E. Wiesel, 1972. *Bygghforskningens informationsblad: Permeabilitet och kapillaritet*, Statens institut för byggnadsforskning, Stockholm. ISBN 91-540-2050-6

Fetter, C.W., 1999. *Contaminant Hydrogeology*. 2nd ed., Prentice Hall. ISBN 0-13-751215-5

Grip, H. och A. Rodhe., 1994. *Vattnets väg från regn till bäck*. Hallgren & Fallgren Studieförlag AB. ISBN: 91 7382 724 X

Jansson, T., 1998. *Miljötekniska markundersökningar inom oljehamnen i Sundsvall – Huvudrapport*, Golder Associates AB, 97-906.

Jansson, T., 1999. *Kontrollprogram avseende grundvattenföroreningar inom Sundsvalls oljehamn*, Golder Associates AB, 99-449.

Jansson, T., 2002. *Kemisk analys av olja från förorenade områden inom sundsvalls oljehamn*; Golder Associates AB, 99-449.

Lenhard, R.J och J.C Parker, 1990. *Estimation of Free Hydrocarbon Volume from Fluid Levels in Monitoring Wells*. Ground Water. Vol. 28, No.1, p 57-67.

Mualem, Y., 1976. *A new model for predicting hydraulic conductivity of unsaturated porous media*. Water Resour. Res., 12:513-522.

Osanius, M., 2007. *Upprättande av numerisk grundvattenmodell över Sundsvalls oljehamn*. Institutionen för geovetenskaper, Uppsala Universitet, Uppsala. ISSN 1401-5765

Miller, R.R., 1996. *Bioslurping – Technology Overview Report*. Groundwater Remediation Technologies Analysis Center (GWRTAC). Report TO-96-05.
http://www.clu-in.org/downloads/toolkit/slurp_o-pdf

Rajkai, K., S. Kabos, MT. Van Genuchten, PE. Jansson, 1996. *Estimation of water-retention characteristics from bulk density and particle-size distribution of Swedish soils*. Soil Science vol. 161. No. 12

SGF, 1984. *Jordarters indelning och benämning*. Byggnadsforskningens informationsblad. Statens institut för byggnadsforskning. ISBN 91-540-4113-9

Sundsvalls tidning, 2005. ”Det finns betydligt mycket mer olja i Sundsvalls oljehamn än vad man tidigare trott”; Publicerad 2001-10-21 [03:00]. Länk:
http://www.st.nu/nyheter/lokalt.php?action=visa_artikel&id=165978

van Genuchten, M.T., 1980. *A closed-form equation of predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil*. Soil Sci. Soc. Am . J. 44: 892-898.

Zilliox, L. och P.Muntzer, 1975. *Effects of hydrodynamic processes on the development of ground-water pollution: Study on the physical models in a saturated porous media*. Progress in Water Technology 7, no. 3/4: 561-568.

8.2 Kartor

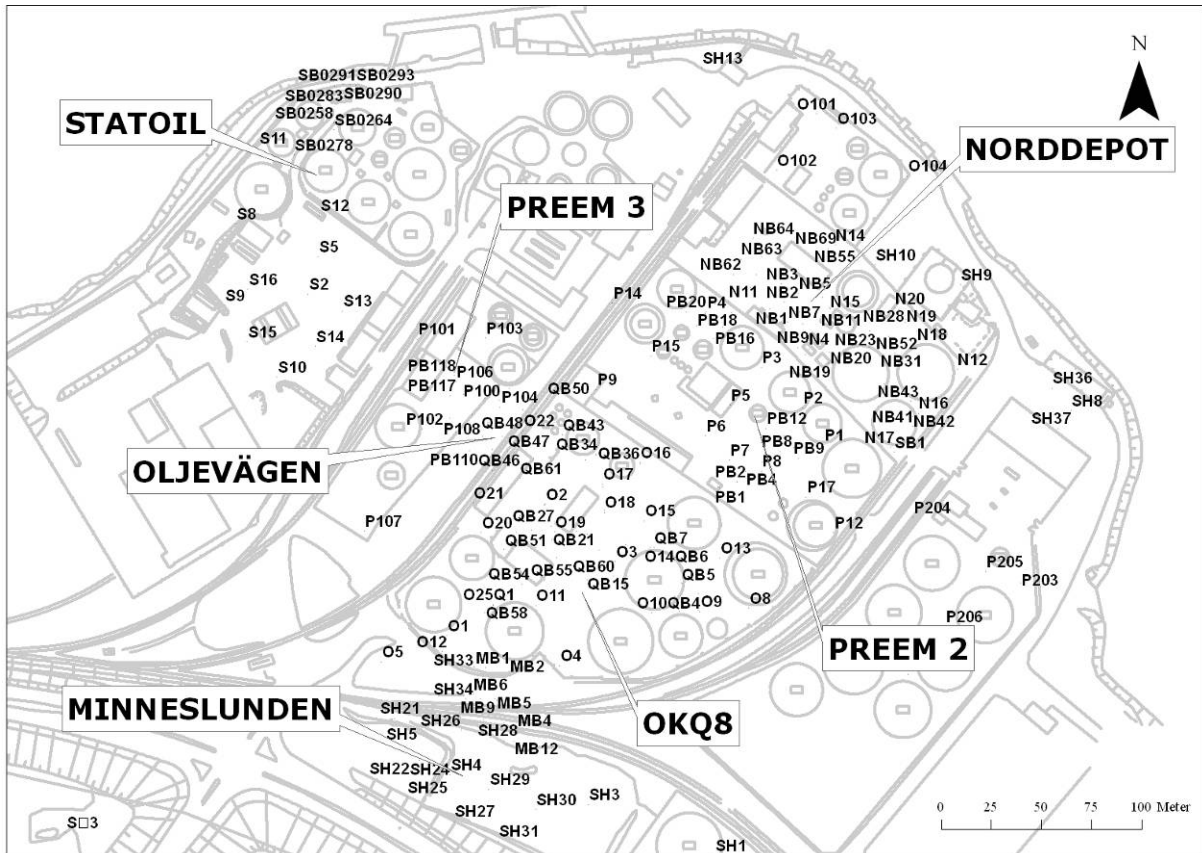
Jordartskarta SGU, Kvittoplott JOGI 17H Sundsvall SO.

8.3 Datorprogram

Adobe Reader, Version 7.0.1. Adobe Systems Incorporated, 1984 – 2004.
ESRI ArcGIS 9.2 (Build 580) 1999-2004 ESRI, Inc.
Notepad, Version 5.1, 1981 – 2001.
Microsoft Excel 2003

BILAGOR

BILAGA 1 – SITUATIONSPLAN



Figur 1 – Situationsplan över Sundsvalls oljehamn som visar hamnens delområden samt grundvattenbrunnarnas lägen. Saneringsbrunnar har ett B med i beteckningen. De övriga är kontrollbrunnar.

BILAGA 2 – PROVTAGNINGSKARTA OCH PROVTAGNINGSPROTOKOLL FÖR JORD



Figur 1 -Provtagningskarta för jord- och oljeprover tagna i maj 2007

Tabell 1 - Provtagningsprotokoll (jord). Maj 2007.

Provpkt	Plats	Markyta (rel ToC i närliggande brunn)	Djup	Jordart	Provtagning	Anm	Normal GV-nivå	Normal oljenivå	Prov för analys
1	Norddepot	30 cm under NB14	0.0 - 1.1	F gr/sa	0.0 - 1.0		3,90	3,03	JP1
			1 - 2.2	F gr/sa	1 - 2.2				
			2.2 - 2.4	le Si	2.2 - 2.4				
			2.4 - 3.0	Trä sa/gr	2.4 - 3.0				
			3.0 - 4.0	si Sa	3.0 - 4.0	Diesellukt			
4.0 - 5.0	si Sa	4.0 - 5.0							
2	OKQ8	20 cm över OB18	0.0 - 0.5	F st/gr/sa	0.0 - 0.5		4,70	4,27	JP2 JP3
			0.5 - 1.0	Le	0.5 - 1.0				
			1.0 - 1.9	Si	1.0 - 1.9				
			1.9 - 3.0	le Si	1.9 - 3.0				
			3.0 - 4.0	si Sa	3.0 - 4.0				
			4.3 - 4.6	si Sa	4.3 - 4.6	Bensinlukt			
4.6 - 5.0	si Sa	4.6 - 5.0	Bensinlukt						
5.0 - 6.0	si Sa	5.0 - 5.7							
3	OKQ8	20 cm under OB57	0.0 - 0.1	le/sa/gr	0.0 - 0.1		5,30	5,11	JP4 JP5
			1.0 - 2.0	Le (sulfid)	1.0 - 2.0				
			2.0 - 3.0	le Si					
			3.2 - 4.0	Sa (fin)	3.2 - 4.0				
			4.5 - 5.0	Si Sa	4.5 - 5.0	Bensinlukt			
5.4 - 6.0	si Sa	5.4 - 6.0							
4	Preem 3	40 cm under PB112	0.0 - 1.0	F sa/gr	0.0 - 1.0		6,00	5,62	JP6
			2.2 - 3.0	Le (sulfid)	2.2 - 3.0				
			3.0 - 4.0	Le	3.0 - 4.0				
			5.0 - 6.0	Si	5.0 - 6.0	Bensinlukt			
5	Preem 2	40 cm under PB10	0.0 - 1.0	F sa/gr			3,90	3,22	JP7
			1.0 - 2.0	F trä/tegel/sa/gr					
			2.8 - 4.0	si Sa	2.8 - 4.0				
			4.0 - 5.0	si Sa	4.0 - 5.0				
6	Norddepot	20 cm över NB4	0.0 - 1.0	F sa/gr	0.0 - 1.0		3,13	2,81	JP8
			2.0 - 3.0	si Sa	2.0 - 3.0	?			
			3.0 - 4.0	si Sa	3.0 - 4.0	Diesellukt			

Markerar där den fria fasen i snitt ligger
 Markerar där den fria fasen ligger ibland

BILAGA 3 - KORNSTORLEKSANALYS

Tabell 1 – Labsvar från kornstorleksanalys på SLU

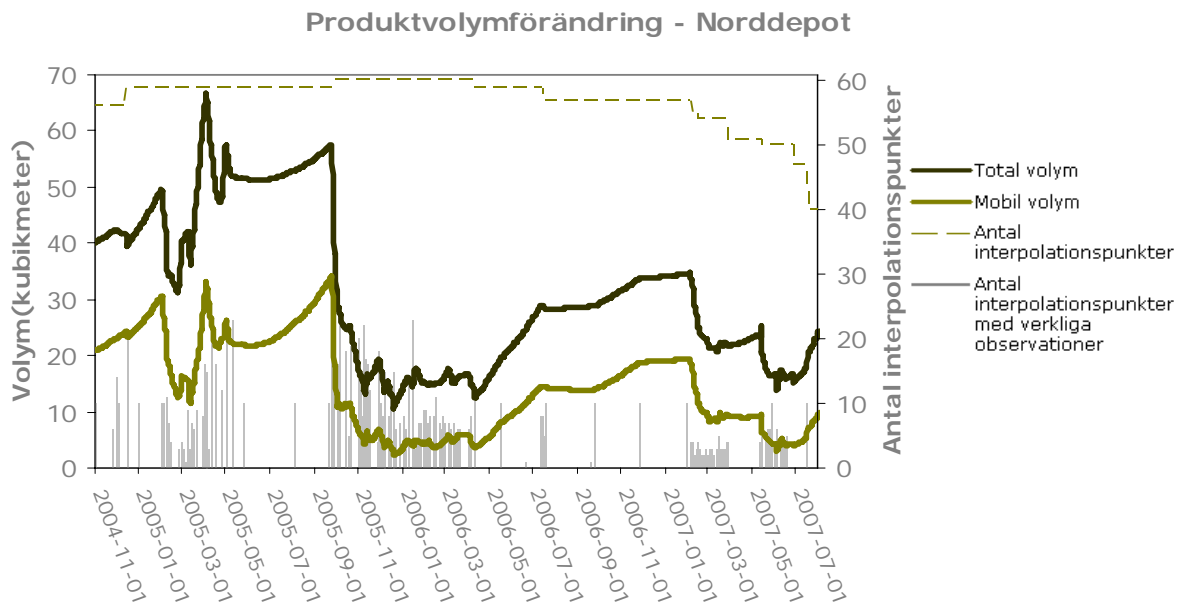
<i>Nr</i>	<i>Plats</i>	<i>Lera</i>	<i>Finsilt</i>	<i>Mellansilt</i>	<i>Grovsilt</i>	<i>Finsand</i>	<i>Mellansand</i>	<i>Grovsand</i>
JP1	Norddepot (NB14)	2,2	2,1	7,4	27,6	50,5	8,2	1,9
JP2	OKQ8 (OB18)	1,7	1,3	3,3	12,7	32	45,3	3,7
JP3	OKQ8 (OB18)	2,6	2,9	10,3	36,4	44,3	2,7	0,7
JP4	OKQ8 (OB57)	1,6	1,4	1,9	5,4	17,8	52	20
JP5	OKQ8 (OB56)	3	3,6	11	35,9	41,4	3,4	1,7
JP6	Preem 3 (PB112)	4	5	18,6	49,1	21	1,2	1,1
JP7	Preem 2 (PB10)	1,9	2,1	4,5	20,3	51,5	17,4	2,4
JP8	Norddepot (NB4)	2,2	2,6	4,3	8,2	42,9	34,1	5,7

BILAGA 4 – MATEMATISKA SAMBAND MELLAN OBSERVERAD OLJETJOCKLEK I GRUNDVATTENBRUNN OCH VERKLIG FÖRORENINGSMÄNGD I MARK

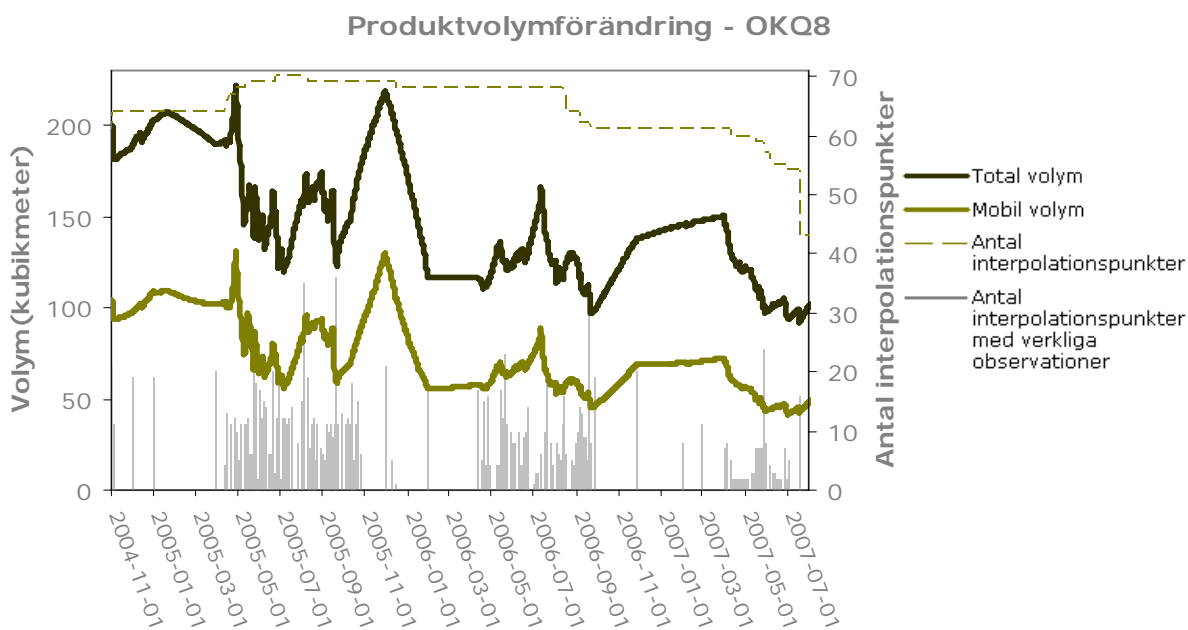
Tabell 1 – Andragradspolynom anpassade till sambanden framtagna med LNAPL Distribution and Recovery Model.

Föroreningssituation	Specifik volym	Specifik saneringsbar volym
Sandig silt, bensin	$y = 0,0047x^2 + 0,0432x - 0,0006$	$y = 0,027x^2 + 0,0078x - 0,0009$
Sandig silt, bensin/diesel	$y = 0,0036x^2 + 0,0015x - 8E-05$	$y = 0,0057x^2 - 0,0023x + 0,0001$
Sandig silt, nedbruten diesel	$y = 0,0017x^2 + 0,0004x - 9E-05$	$y = 0,0023x^2 - 0,0011x + 6E-05$
Siltig sand, bensin	$y = -0,0081x^2 + 0,1232x + 0,0001$	$y = 0,0467x^2 + 0,0385x - 0,0025$
Siltig sand, diesel/bensin	$y = 0,0181x^2 + 0,0347x - 0,0008$	$y = 0,0375x^2 - 0,0003x - 0,0005$
Siltig sand, nedbruten diesel	$y = 0,0178x^2 + 0,0131x + 7E-05$	$y = 0,0272x^2 - 0,0059x + 0,0002$
Sand, bensin	$y = -0,035x^2 + 0,2442x + 0,0032$	$y = 0,0558x^2 + 0,1008x - 0,0048$
Sand, diesel/bensin	$y = 0,0182x^2 + 0,1193x - 0,003$	$y = 0,0695x^2 + 0,0286x - 0,0029$
Sand, nedbruten diesel	$y = 0,0317x^2 + 0,0684x - 0,0018$	$y = 0,0669x^2 + 0,0036x - 0,0011$

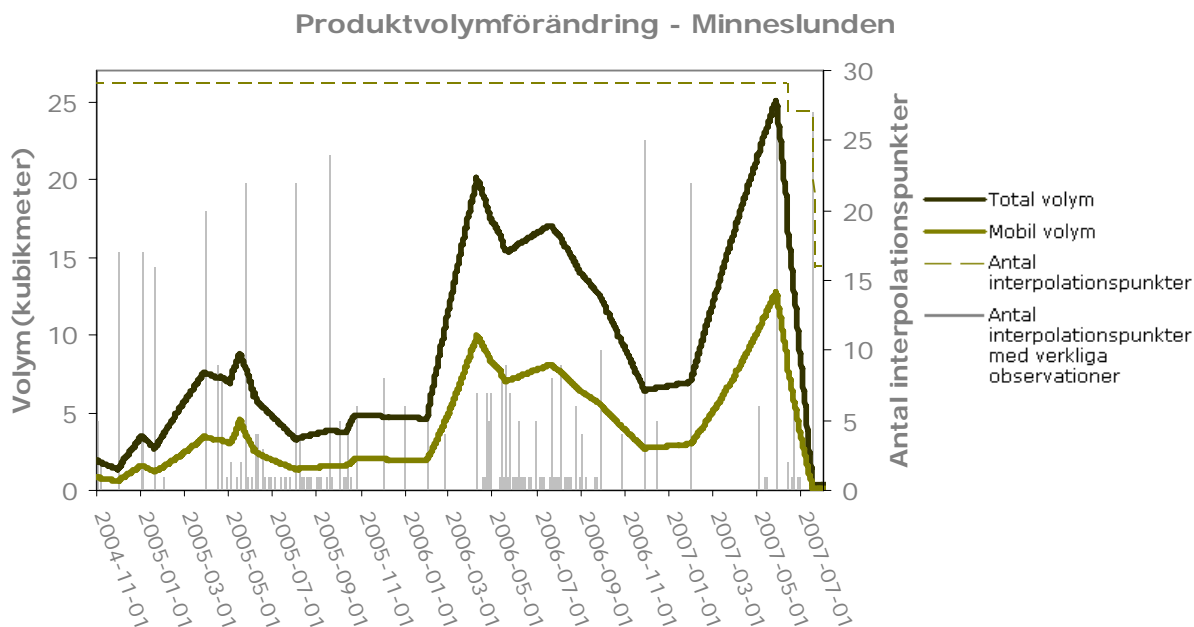
BILAGA 5 – OLJEVOLYMFÖRÄNDRING INOM HAMNENS OLIKA DEPÅOMRÅDEN



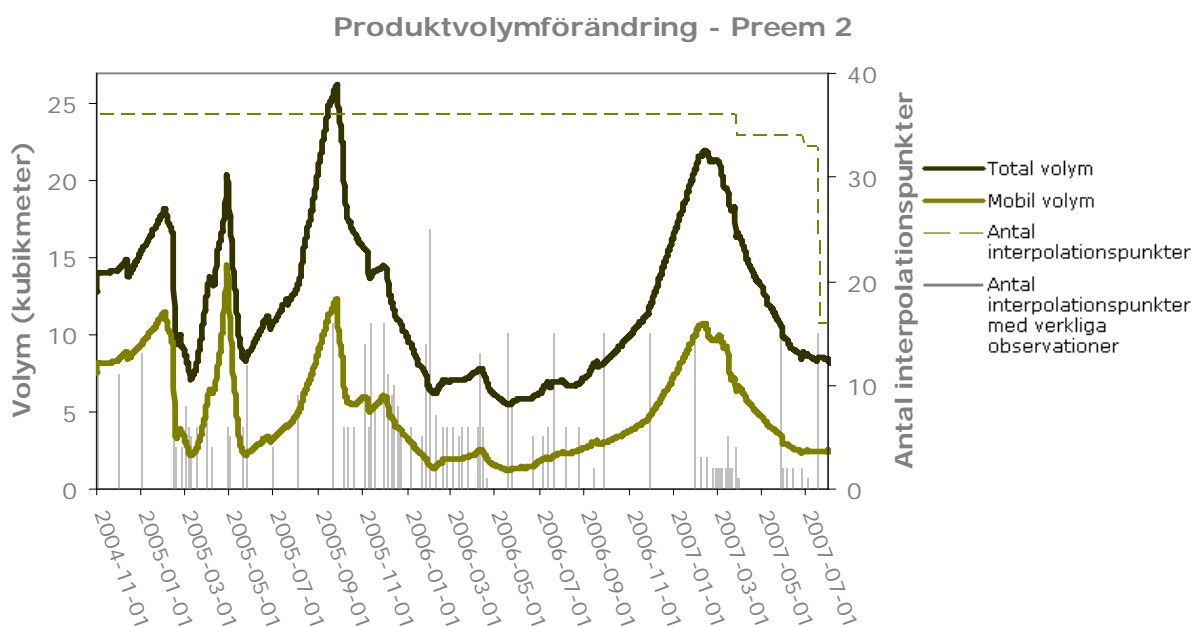
Figur 1 – Förändring av oljevolym inom Norddepot under saneringen (november 2004 – juli 2007). Den totala och mobila volymförändringen visas i den övre respektive nedre kurvan. För varje dag presenteras även antalet interpolationspunkter (antal grundvattenbrunnar) som uppskattningen baseras på i form av den streckade linjen. Andelen verkliga observationer i interpolationspunkterna redovisas i form av staplar. Det maximala antalet brunnar och således interpolationspunkter är 60 stycken



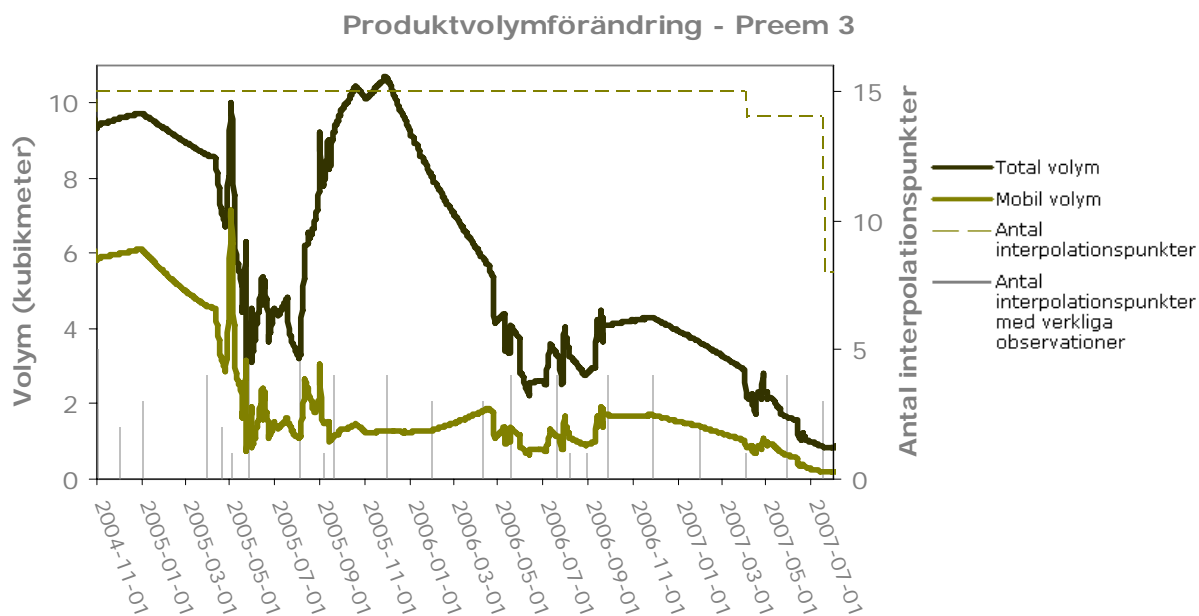
Figur 2 – Förändring av oljevolym inom OKQ8 under saneringen (november 2004 – juli 2007). Den totala och mobila volymförändringen visas i den övre respektive nedre kurvan. För varje dag presenteras även antalet interpolationspunkter (antal grundvattenbrunnar) som uppskattningen baseras på i form av den streckade linjen. Andelen verkliga observationer i interpolationspunkterna redovisas i form av staplar. Det maximala antalet brunnar och således interpolationspunkter är 70 stycken



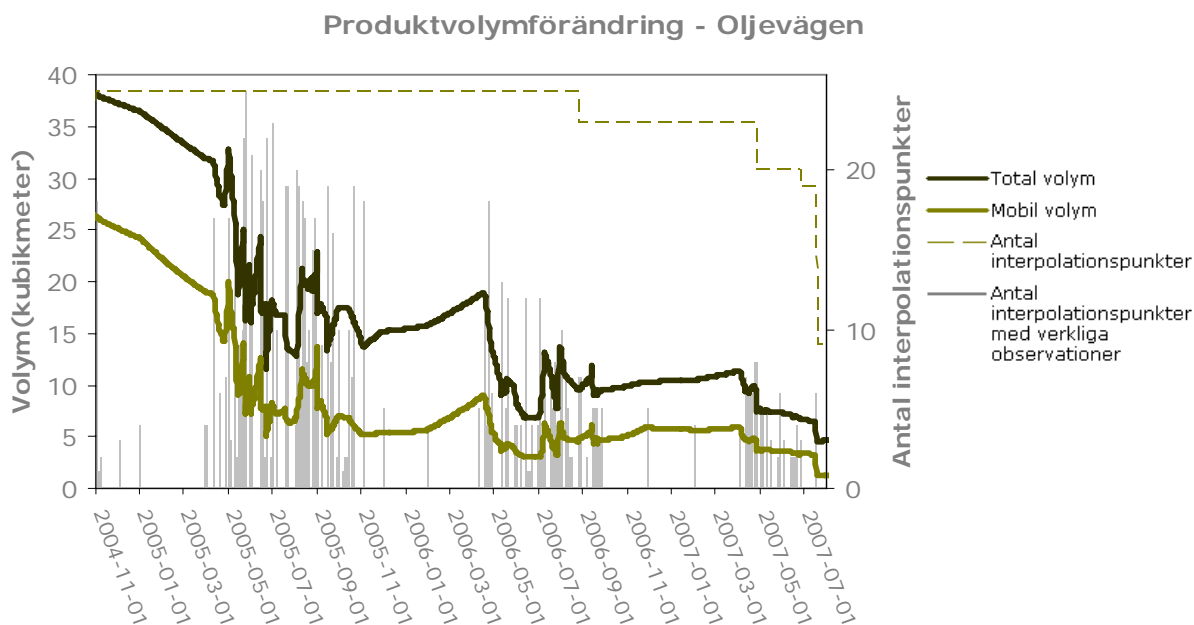
Figur 3 – Förändring av oljevolym inom Minneslunden under saneringen (november 2004 – juli 2007). Den totala och mobila volymförändringen visas i den övre respektive nedre kurvan. För varje dag presenteras även antalet interpolationspunkter (antal grundvattenbrunnar) som uppskattningen baseras på i form av den streckade linjen. Andelen verkliga observationer i interpolationspunkterna redovisas i form av staplar. Det maximala antalet brunnar och således interpolationspunkter är 29 stycken



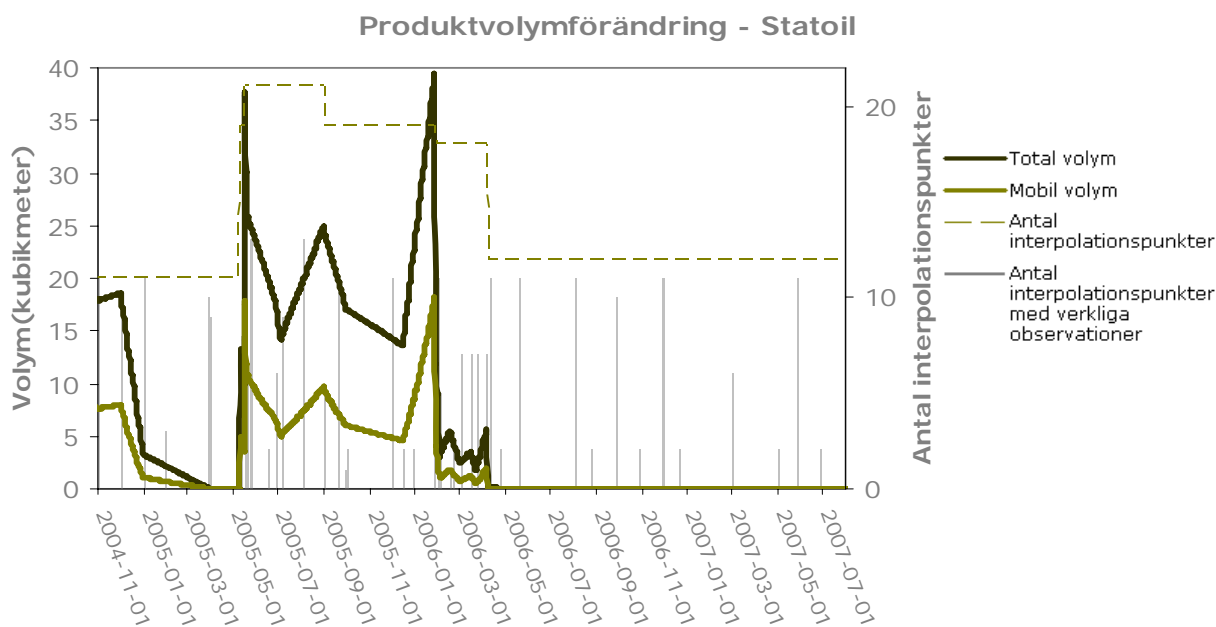
Figur 4 – Förändring av oljevolym inom Preem 2 under saneringen (november 2004 – juli 2007). Den totala och mobila volymförändringen visas i den övre respektive nedre kurvan. För varje dag presenteras även antalet interpolationspunkter (antal grundvattenbrunnar) som uppskattningen baseras på i form av den streckade linjen. Andelen verkliga observationer i interpolationspunkterna redovisas i form av staplar. Det maximala antalet brunnar och således interpolationspunkter är 36 stycken



Figur 5 – Förändring av oljevolym inom Preem 3 under saneringen (november 2004 – juli 2007). Den totala och mobila volymförändringen visas i den övre respektive nedre kurvan. För varje dag presenteras även antalet interpolationspunkter (antal grundvattenbrunnar) som uppskattningen baseras på i form av den streckade linjen. Andelen verkliga observationer i interpolationspunkterna redovisas i form av staplar. Det maximala antalet brunnar och således interpolationspunkter är 15 stycken



Figur 6 – Förändring av oljevolym under Oljevägen under saneringen (november 2004 – juli 2007). Den totala och mobila volymförändringen visas i den övre respektive nedre kurvan. För varje dag presenteras även antalet interpolationspunkter (antal grundvattenbrunnar) som uppskattningen baseras på i form av den streckade linjen. Andelen verkliga observationer i interpolationspunkterna redovisas i form av staplar. Det maximala antalet brunnar och således interpolationspunkter är 25 stycken



Figur 7 – Förändring av oljevolym inom Statoil under saneringen (november 2004 – juli 2007). Den totala och mobila volymförändringen visas i den övre respektive nedre kurvan. För varje dag presenteras även antalet interpolationspunkter (antal grundvattenbrunnar) som uppskattningen baseras på i form av den streckade linjen. Andelen verkliga observationer i interpolationspunkterna redovisas i form av staplar. Det maximala antalet brunnar och således interpolationspunkter är 21 stycken