



STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE



Naturlig självrening av oljeprodukter i mark och grundvatten

– Slutrapport

BO LIND
LENNART LARSSON
JOHAN NORDBÄCK
GUNNEL NILSSON
CHARLOTTA TIBERG

Varia 541:2

LINKÖPING 2004



STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE

Varia 541:2

**Naturlig självrening av oljeprodukter
i mark och grundvatten**
– Slutrapport

BO LIND
LENNART LARSSON
JOHAN NORDBÄCK
GUNNEL NILSSON
CHARLOTTA TIBERG

Varia	Statens geotekniska institut (SGI) 581 93 Linköping
Beställning	SGI Litteraturtjänsten Tel: 013-20 18 04 Fax: 013-20 19 09 E-post: info@swedgeo.se Internet: www.swedgeo.se
ISSN	1100-6692
ISRN	SGI-VARIA--04/541--SE
Projektnummer SGI	10801
Dnr SGI	4-0005-0324
©	Statens geotekniska institut

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	Om projektet	4
1.1	Publikationer	4
1.2	Genomfört arbete	5
1.3	Projektgrupp och samarbetspartners	5
2	Bakgrund	6
2.1	Begrepp och definitioner	6
2.2	Syfte	7
3	Bevis på naturlig självrening	7
	Primärt bevis	8
	Sekundärt bevis	9
	Tertiärt bevis	10
4	Försöksområden i Sverige	11
4.1	Sollentuna	12
4.1.1	Utförda undersökningar	13
4.1.2	Modellering	14
4.1.3	Slutsatser från Sollentuna	14
4.2	Brånshult	15
4.2.1	Utförda undersökningar	17
4.2.2	Modellering	17
4.2.3	Slutsatser från Brånshult	18
5	Förutsättningar för naturlig självrening i Sverige	19
6	Vägledning för utförande av naturlig självrening i Sverige	20
6.1	Kriterier för utnyttjande av KNS	24
6.1.1	Specifikt Kriteria 1. Efterbehandling KNS	24
6.1.2	Specifikt Kriteria 2. Efterbehandling generellt.	25
6.1.3	Generellt Kriteria 1 och Kriteria 2.	26
7	Efterord	27
7.1	Implementering	28
7.2	Tack till	28
8	Referenser	28

1 OM PROJEKTET

Föreliggande rapport utgör slutredovisning av projektet ” Naturlig självrening av olje-produkter i mark och grundvatten – metodutveckling för svenska förhållanden”, som samfinansierats av Formas och Statens geotekniska institut. Projektet har bedrivits under perioden 2001 – 2003 inom Formas insatsområde ”Mark och vatten i stadsmiljön”. Projektnummer hos Formas har varit 25.0/2001-0453. De studerade pilotområdena i Brånshult och Sollentuna har undersökts parallellt av SPIMFAB, inom ramen för konventionella saneringsprojekt. SPIMFAB har ställt grundvattenrör och analysdata till förfogande vilket har varit ett viktigt tillskott till projektet.

1.1 Publikationer

I tillägg till denna slutrapport finns följande publikationer från projektet:

Larsson, L., Lind, B. 2004: Naturlig självrening av petroleumförorenade markområden – Vägledning . SGI Varia 541:1.

Larsson, L., Gabrielsson A., Lind, B. 2004: Naturlig självrening av oljeprodukter i mark – Pilotstudie i Brånshult, Östergötland. SGI Varia 541:3.

Nordbäck, J., Tiberg, C. 2004: Naturlig självrening av oljeprodukter i mark – Pilotstudie i Sollentuna, Stockholm. SGI Varia 541:4.

Projektet har rönt stort intresse från många håll och arbetet har beskrivits i en rad artiklar i branschtidskrifter:

Lennart Larsson, Bo Lind, 2001: Kontrollerad naturlig självsanering utförs av världens viktigaste oljesanerare. Artikel, Miljöforskning, 3:01, pp 20-21.

Margareta Redlund, 2003: Bakterier som Oljesanerare, Artikel, Byggindustrin, 04/2003, p 18.

Catrin Offerman, 2003: Prognosverktyg för självsanering av oljeföroreningar utvärderas, Artikel, Miljö & Utveckling, 15 #1:2003, p 26.

Naturvårdsverket, Nyhetsbrevet m-plus, 2002: Oljeföroreningar försvinner med tiden, Notis m-plus, 13, 23 okt 2003, p 13.

Projektet har redovisats muntligt och med abstract på följande seminarier:

Nätverket Renare Marks Höstmöte, Umeå 22-23 oktober 2003.

Naturlig självrening av oljeprodukter i mark och grundvatten, Stockholm 3 juni 2003.

1.2 Genomfört arbete

Arbetet har omfattat följande moment:

- Inventering av petroleumförorenade områden och val av pilotområden
- Fältinstrumentering och genomförande av naturlig självreningsundersökning i Brånshult, Motala k:n.
- Fältinstrumentering och genomförande av naturlig självreningsundersökning i Kv Estländaren, Sollentuna k:n.
- Sammanställning, forskarseminarier samt utvärdering av resultat och erfarenheter.
- Rapportering.

1.3 Projektgrupp och samarbetspartners

Projektgruppen har bestått av följande personer:

Bo Lind, Docent, Miljögeoteknik, Projektledare	(SGI)
Lennart Larsson, Civ Ing, Kemiteknik	(SGI)
Johan Nordbäck, Fil dr, Kemi	(SGI)
Gunnel Nilsson, Ms Sc, Geologi	(SGI)
Anna Gabrielsson, Civ Ing, Miljögeoteknik	(SGI)
Charlotta Tiberg, Civ Ing, Kemiteknik	(Lunds tekn. högskola/SGI)
William Mahaffey, PhD, Chemistry	(Pilorum, USA)

Inom pilotområdena har ett viktigt samarbete skett mellan projektet och konsulter som på uppdrag av SPIMFAB (Svenska Petroleuminstitutets Miljösaneringsfond) utfört undersökningar och saneringsåtgärder i områdena. Särskilt vill vi nämna, Rolf Randborg och Leif Ljung, SPIMFAB, Sten Bergström, WSP Stockholm samt Anna Gabrielsson, SGI Linköping.

Projektets referensgrupp har bestått av följande personer som lämnat värdefulla synpunkter på projektets uppläggning och presentation:

Björn Sellberg, FORMAS
Sandra Broms, SPIMFAB
Jonny Bard, Länsstyrelsen i Östergötlands län
Yvonne Österlund, Naturvårdsverket
Ann-Christine Granfors, Miljökontoret Sollentuna k:n

2 BAKGRUND

2.1 Begrepp och definitioner

– Naturlig självreningsundersökning (NS), kontrollerad naturlig självrening (KNS) och förstärkt naturlig självrening (FNS)

Naturlig självrening (NS) är en undersökningsmetodik som innefattar kartläggning av ett brett register naturligt förekommande processer som bryter ned och begränsar föroreningars transport i marken. Den biologiska, mikrobiella nedbrytningen av oljeprodukterna är ofta den viktigaste delen i naturlig självrening, men sorption, advektion och dispersion är också verksamma processer. NS undersökning av petroleumprodukter fokuseras normalt på lösta, miljöfarliga och spridningsbenägna föroreningar i grundvatten. Med NS undersöks platsspecifik potential att på ett säkert sätt och under acceptabel tid reducera halter av föroreningar till acceptabla sluthalter samtidigt som det förhindras att föroreningarna når betydelsefulla recipienter.

Om undersökningen visar att området på ett säkert sätt och med fördel kan nyttja NS kan området tillåts genomgå *kontrollerad naturlig självrening* (KNS). KNS är en saneringsmetod som använder sig av undersökningsmetodik desamma som används under själva NS undersökningen. I de fall de processer som ingår i en NS-undersökning nyttjas i saneringssammanhang övergår alltså NS undersökning i att vara KNS. Detta sker dock alltså först efter att NS visat att ett förorenat område har tillräckligt hög potential att kunna nå uppsatta saneringsmål, ofta inom acceptabel tid, med KNS. KNS är alltså en saneringsmetod medan NS är en undersökningsmetodik för att klargöra lämpligheten att applicera KNS. KNS innefattar alla de passiva (dvs ej av människan påverkade) miljöprocesser som resulterar i att saneringsmålen nås inom acceptabel tidsram. KNS är därtill endast lämplig då människa och miljö är adekvat skyddade under tiden som processerna pågår samt normalt då totala kostnaden för KNS understiger alternativa saneringsmetoder.

Mänsklig inverkan kan ske i en variant av FNS, sk *förstärkt naturlig självrening* (FNS) ("Enhanced natural attenuation"). Med FNS påskyndas de naturliga saneringsprocesserna (främst mikrobiella) genom tillförsel in situ av nedbrytningsstimulerande ämnen. Ingen uppumpning av grundvatten sker dock, annars blir metoden alltför påverkad av människan för att kunna kallas självrening. FNS är att betrakta som en "halvaktiv" saneringsmetod, i motsats till KNS som är en passiv dito.

De saneringsmetoder som hittills har utnyttjats i Sverige har vanligen inneburit omfattande ingrepp med uppgrävning av jord och i en del fall pumpning av grundvatten. Metoderna är kostsamma och får därför begränsad användning. Det finns idag ett stort behov av att bättre kunna bedöma konsekvenserna av en konstaterad förorening, dess dynamiska förändringar och anpassa saneringsåtgärderna därefter. Val av saneringsmetod bör i större utsträckning än idag ta hänsyn till platsens specifika förutsättningar. En av flera faktorer som bör beaktas i detta sammanhang är att oljeprodukterna kan brytas ned på biologisk väg. De biologiska processerna vid oljenedbrytning är relativt väl kända och har beskrivits i tidigare projekt (*Larsson et. al 1994; Lindmark & Larsson 1995*).

Processer med biologisk nedbrytning har i Sverige hittills framför allt använts vid aktiva saneringsingripanden. På senare tid har det framkommit överväldigande bevis på att

naturen innehar stor förmåga att själv rena områden förorenade med petroleumprodukter (*Larsson 1998*). Fältundersökningar har indikerat att denna reduktion främst beror på biologisk nedbrytning (*Hadley & Armstrong 1991*). Resultat från omfattande undersökningsprogram genomförda i USA har visat att naturlig självrening sanerat ett mycket stort antal områden, förorenade med petroleumprodukter. I de fall naturlig självrening sker med godtagbar hastighet och omfattning och samtidigt ger ett tillfredsställande skydd för människor och miljö, accepterar bl a Amerikanska Naturvårdsverket (USEPA) naturlig självrening som ett alternativ till aktiva saneringsingripanden (*Tulis 1998; Hicks & Rizvi 1996*).

Naturlig självrening har ännu ej används i Sverige som metod för sanering av oljeförorenade markområden. En av de primära orsakerna är sannolikt att det inte föreligger någon beskrivning eller erfarenhet av hur metoden kan tillämpas i svenska jordar. Metodbeskrivningen måste vara utformad så att genomförd undersökning enligt denna, ger relevant underlag för beslut avseende metodens lämplighet för varje enskilt förorenat område. Resultaten ska därtill kunna ingå i underlaget för en riskbedömning samt en miljökonsekvensbeskrivning av det förorenade området. Ur forskningssynpunkt handlar det om att klarlägga om de naturliga självreningprocesserna är verksamma i svenska jordar samt att anpassa metodiken för NS-undersökning till svenska förhållanden och för aktuella svenska frågeställningar. Situationen i Sverige innebär ofta relativt ytligt grundvatten, kallt klimat och kuperat landskap med begränsade avrinningsområden.

2.2 Syfte

Projektet har haft två huvudsyften; att genom fullskaliga fältundersökningar klarlägga potentialen för naturlig självrening i Sverige samt att, på basis av internationell kunskap och erfarenheterna från pilotundersökningarna, upprätta en vägledning för naturlig självreningundersökning i Sverige.

3 BEVIS PÅ NATURLIG SJÄLVRENING

För att KNS skall kunna anses vara lämpad för ett område krävs bevis och dessa tas fram i NS undersökningen. En viktig del i bevisföringen är att visa att biologisk nedbrytning av förorening sker i området. För att KNS skall kunna accepteras räcker det alltså inte med att visa att föroreningsplymen minskar eller ev. är stationär baserat enbart på faktorer som utspädning, fastläggning etc. Pågår inte biologisk nedbrytning av förorening är KNS ofta inget acceptabelt saneringsalternativ även om plymen alltså minskar.

Bevis tas fram genom återkommande provtagning och analys av ett tillräckligt antal punkter under 1-3 års tid eller tills en definitiv trend avseende föroreningsens öde är fastställd. Provtagning och analys kan vid behov behöva utföras upp till fyra ggr per år. Bevisen för NS avseende petroleumkolväten indelas i tre huvudgrupper enligt:

- Primärt
- Sekundärt
- Tertiärt (krävs endast i undantagsfall för petroleumföreningar).

Primärt bevis

Detta primära bevis kan i vissa fall ensamt ingå, eller alternativt ingå som del, i den totala bevisföring som krävs för att KNS skall kunna beaktas som saneringsmetod. Det primära beviset är uppbyggt av ett antal delbevis. För att ta fram underlag för dessa krävs bl a design av provpunktsplacering, provtagningsfrekvens och analys av indikatorföreningar och parametrar. Själva bevisföringen utförs därefter genom att jämföra erhållna resultat från undersökningarna av petroleumparimetrar, enligt tabell 1 med övrig data, enligt tabell 2.

Tabell 1. *Lämpliga petroleumparimetrar att analysera i grundvatten för NS-undersökning för framtagande av primärt bevis.*

Föreningar/parametrar	Analysorsak
Bensen, toluen, etylbensen, xylener (BTEX)	Primära spridnings- och modelleringsföreningar.
TPH ^{a/}	Ger både polära och opolära kolväteföreningar C ₉ -C ₃₅ ^{b/} (dvs inkl. bl. a. organiska syror som bl. a. kan vara nedbrytningsprodukter av petroleumföreningar), ger indikation på den totala mikrobiella kolbelastningen.
Oljeindex	Ger endast opolära kolväten i intervallet C ₁₀ -C ₄₀ . TPH minus Oljeindex ger ,grovt sett, andel kolföreningar som delvis har oxiderats/brutits ned. Föreligger tyngre äldre eldningsolja kan differensen till del eventuellt indikera heteroatomer (t ex svavelbaserade).

a/ Kan eventuellt ersättas med sk. Nordtest (SPIMFAB) som är en summaparameter för opolära och polära kolväten inom intervallet C₆-C₃₅. I den sammahalten inkluderas bl a BTEX.

b/ Analysen kan alternativt fås för intervallet C₁₀-C₄₀.

Tabell 2. Sammanfattande tabell för primära delbevis för bedömning av naturlig självrening.

Ämne/parameter	Roll/betydelse	Primärt delbevis: Differens i plym visavi i grundvatten uppströms hot spot
Föroreningsplym	Skall provtas under fyra kvartal och sammantaget tydligt visa retardation	-
Löst syre	Konsumtion av denna elektronacceptor.	↓
Temperatur	Indikerar energiutveckling av bionedbrytning.	↑
pH	Indikerar mikrobiell respiration av CO ₂ .	↓ →
Specifik konduktivitet	Hjälper till att klarlägga att prover tas från samma akvifär.	→

Not: Med pil ned (↓) menas att en minskning av ämnet/parametern i förorenad zon visavi i icke förorenat vatten uppströms föroreningskällan indikerar nedbrytning av förorening. Med pil upp (↑) menas att en ökning av ämnet / parametern i förorenad zon visavi i icke förorenat vatten uppströms föroreningskällan indikerar nedbrytning av förorening. Med horisontell pil (→) menas relativt konstanta värden; indikerar att provtagning skett i samma akvifära zon.

Sekundärt bevis

Det sekundära beviset är uppdelat i delbevis och baseras på geokemiska analysdata, främst mikrobiellt nyttjande av elektronacceptorer (komplement till delbevis i det primära beviset), samt haltförändringar av kolväteföreningar. Minskning av föroreningshalter skall alltså kunna korreleras till tillräckligt nyttjande av elektronacceptorer (indirekt bevis på nedbrytning). Därtill ingår att uppskatta reduktionskonstanter avseende föroreningshalter samt vid behov bedömning av total saneringstid.

I tabell 3 ges en förenklad sammanfattning av det sekundära beviset. Normalt räcker det med att med isolinjer beskriva nyttjandet av elektronacceptorer tillsammans med föroreningsutbredningen. Emellertid, ytterligare information avseende områdets potentiella möjligheter att ta hand om områdets föroreningar, dess sk assimilativa kapacitet, kan enkelt uppskattas genom beräkning av hur mycket en viss konsumtion av elektronacceptorer motsvarar i nedbrytning av kolväten.

Tabell 3. Sammanfattande tabell för sekundära delbevis för bedömning av naturlig självrening.

Ämne/parameter	Roll/betydelse	Sekundärt delbevis: Differens i plym visavi i grundvatten uppströms hot spot
Reduktionstid och prognoserad plymstatus	Acceptans saneringstid.	-
Nitrat (NO_3^-)	Konsumtion av denna elektronacceptor vid syreunderskott.	↓
Mangan (Mn^{2+})	Metabolisk biprodukt vid reduktion av elektronacceptorn Mn^{4+} . Kan accepteras att utelämnas om svenska labb inte utför.	↑
Järn (Fe^{2+})	Metabolisk biprodukt vid reduktion av elektronacceptorn Fe^{3+} .	↑
Sulfat (SO_4^{2-})	Konsumtion av denna elektronacceptor.	↓

Not: Med pil ned (↓) menas att en minskning av ämnet/parametern i förorenad zon visavi i icke förorenat vatten uppströms föroreningskällan indikerar nedbrytning av förorening. Med pil upp (↑) menas att en ökning av ämnet / parametern i förorenad zon visavi i icke förorenat vatten uppströms föroreningskällan indikerar nedbrytning av förorening.

Tertiärt bevis

På samma sätt som för det primära och det sekundära beviset är detta tertiära bevis uppbyggt av delbevis. Dessa delbevis krävs normalt inte för petroleumkolväten. Endast i undantagsfall behövs hela/delar av tertiärt bevis, då det primära och tertiära beviset tillsammans inte ger resultat som övertygande visar att mikrobiell nedbrytning av petroleumkolvätena pågår i området. I tabell 4 ges en sammanfattande beskrivning av det tertiära delbevisen.

Tabell 4. Sammanfattande tabell av tertiära delbevis för bedömning av naturlig självrening.

Ämne/paramet er	Roll/betydelse	Tertiärt delbevis: Differens i plym visavi i grundvatten upp- ströms hot spot
Intermediärer	Produktion direkt delbevis på mikrobiell nedbrytning.	↑
Mikrobiella labbstudier	Sällan nödvändiga som bevis för NS avseende petroleumpro- dukter.	-
Metan (CH ₄)	Produktion indikerar nedbryt- ningsaktivitet.	↑
Koldioxid (CO ₂)	Genereras i alla nedbrytningsreak- tioner.	↑
Alkalinitet	Differenser indikerar nedbrytning.	↑
Redox	Differenser indikerar nedbrytning.	↓
Näringsämnen	Krävs för celluppbyggnad. Sällan begränsande for NS.	-

Not: Med pil ned (↓) menas att en minskning av ämnet/parametern i förorenad zon visavi i icke förorenat vatten uppströms föroreningskällan indikerar nedbrytning av förorening. Med pil upp (↑) menas att en ökning av ämnet / parametern i förorenad zon visavi i icke förorenat vatten uppströms föroreningskällan indikerar nedbrytning av förorening

4 FÖRSÖKSOMRÅDEN I SVERIGE

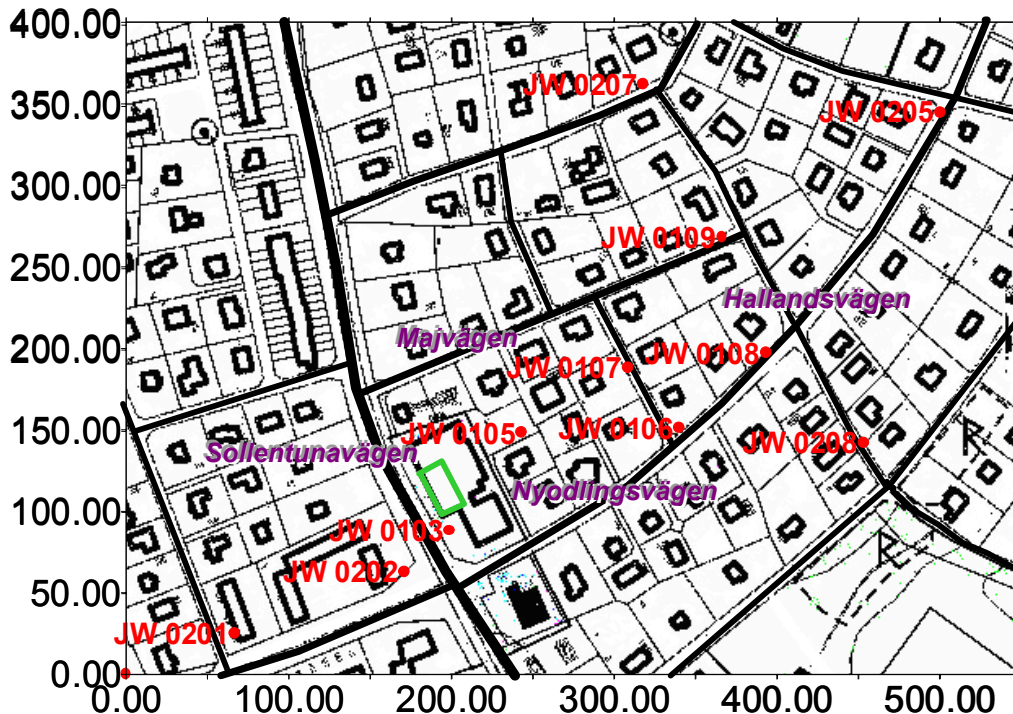
Nedan följer en kort sammanfattning av utförda undersökningar och resultat för genomförda pilotstudier i Sollentuna respektive Brånshult. För fullständig redovisning av pilotstudierna hänvisas till rapporterna, ”Nordbäck m.fl. 2004, Naturlig självrening av oljeprodukter i mark och grundvatten, Pilotstudie Kv Estländaren Sollentuna, SGI-rapport ” respektive ”Larsson m.fl. 2004, Naturlig självrening av oljeprodukter i mark och grundvatten, Pilotstudie Brånshult, Motala, SGI-rapport ”.

4.1 Sollentuna

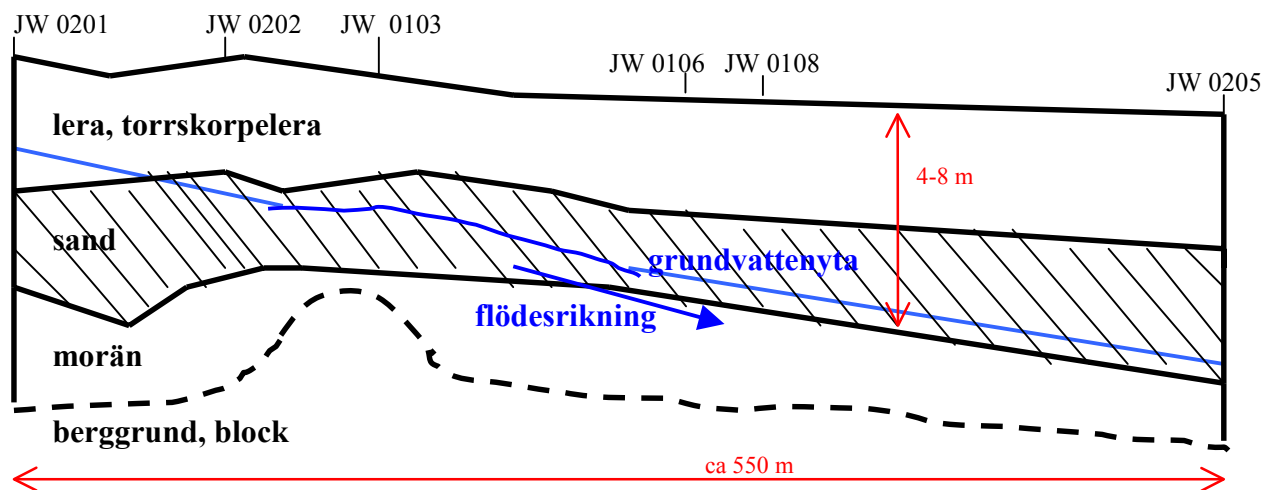
Det undersökta förorenade området ligger i kvarteret Estländaren vid Sollentunavägen i Sollentuna (figur 1). En bensinstation var i bruk på tomten Estländaren 10 från mitten av fyrtio-talet till slutet av åttiotalet (J&W, 2001).

Området har tidigare varit föremål för flera undersökningar och saneringsinsatser och det finns därför sedan tidigare ett antal borrhögar i området. På 60-talet uppmärksammades bensinlukt från marken i närheten av bensinstationen och ett omfattande läckage från cisterner i området uppdagades. De läckande cisternerna byttes då ut. Utöver detta är det inte känt exakt var och när läckage skett men troligen har ett antal tankar/cisterner i området vid bensinstationen läckt ut sammanlagt ca 250-300 m³ petroleumprodukter under 40-60-talen (J&W, 2001). Föroreningsplymen breder ut sig åt nordost, i grundvattenströmningens riktning under kvarter med villabebyggelse. Stora problem med bland annat lukt i källare har sedan länge uppmärksamats i området.

Kv Estländaren valdes som pilotområde främst av två skäl, dels för att studera hur NS kan utnyttjas som stöd till andra saneringsåtgärder och dels för att området var relativt väl känt med en central frågeställning kring spridning kontra nedbrytning av petroleumprodukter. En principiell bild av jordlagerföljd och grundvattennivå ses i figur 2.



Figur 1. Undersökningsområdes läge i Sollentuna. Det förorenade området i Sollentuna med angivande av grundvattenrör (JW) som provtagits av SGI. Den före detta bensinstationen är utmärkt med grön rektangel (ljusgrå i sv/v reproduktion) invid Sollentunavägen.



Figur 2. Geologiskt sektion längs Nyodlingsvägen, i grundvattnets flödesriktning. Kv. Estländaren, Sollentuna.

4.1.1 Utförda undersökningar

Grundvattenprover har tagits och analyserats med avseende på framför allt petroleumkolväten och elektronacceptorer vid fyra tillfällen inom projektet. Två gånger har även prover för isotopanalys tagits, vid första provtagningen kolisotoper och vid andra provtagningen väte- och syreisotoper. Isotoper är föreslagna som komplement för att hitta bevis på NS.

Vid SGI:s provtagningar användes lågflötes-teknik ("Lowflow"-sampling) främst för att minimera avgången av flyktiga ämnen till luft samt undvika luftkontakt före analys av syrekänsliga geokemiska parametrar. Speciella pumpar, så kallade bladderpumpar, sänktes ned i varje grundvattenrör som skulle provtas ungefär en vecka innan provtagningen. Före pumpnedsänkningen mättes djupet till grundvattenytan i punkterna.

Vid provtagning leddes det uppumpade vattnet genom en flödescell där temperatur, konduktivitet, redoxpotential, pH och löst syre mättes kontinuerligt. Grundvattenprov för analys med avseende på petroleumkolväten och elektronacceptorer togs i provflaskor och skickades till laboratorium, se tabell 1. Provtagningarna har försvårats på grund av dålig tillgång på vatten i en del rör.

Tabell 1. Sammanfattning av provtagningar. På grund av problem med vattentillgången har man varit tvungen att byta ut vissa provpunkter mellan provtagningssomgångarna. Den bristande vattentillgången medförde också att det inte fanns möjlighet att vänta på att flödescellens värden skulle bli stabila innan vattenproverna togs. I de flesta fall tilläts bara genomsköljning av slangar och flödescell innan proverna togs.

	pumpsättning	provtagning	antal provtagna punkter
Vår 2002 med bailer (J&W)		26:e april	16 - kolväten 16 - syre 16 - bly
Höst 2002 med low-flow-teknik	5:e september	17-18:e september	7 - kolväten 7 - syre, temp., redox, pH, konduktivitet 5 - elektronacceptorer
Vår 2003 med low-flow-teknik	23:e april	28-29:e april	7 - kolväten 9 - syre, temp., redox, pH, konduktivitet 8 - elektronacceptorer 4 - kolisotoper
Höst 2003 med low-flow-teknik	23:e oktober	5-6:e november	5 - kolväten 5 - syre, temp., redox, pH, konduktivitet 5 - elektronacceptorer - syre- och väteisotoper

4.1.2 Modellering

Vid undersökning av NS har programvaran RBCA Tier 2 Analyzer, här kallad "T2", använts. Parametrar använda i en första modellering återfinns i tabell 2. RBCA Tier 2 Analyzer är en tvådimensionell analytisk/numerisk datorbaserad modell. Modellen är speciellt utformad för att användas vid utvärdering av NS eller "pump and treat"-sanering av mark förorenad med petroleumprodukter eller klorerade lösningsmedel. Programmet hanterar den lösta föroreningsplymen och dess sorption till jordmatrisen men inte föroreningskällor i fri fas. RBCA står för RiskBased Corrective Action som är en riskbaserad beslutsprocess i tre nivåer där T2 kan användas vid utvärdering på nivå 2 (tier 2). T2 är tänkt att vara en användarvänlig programvara som behöver jämförelsevis lite indata

4.1.3 Slutsatser från Sollentuna

Undersökningen har visat att processerna för NS är verksamma inom området. Såväl primära som sekundära (och i någon mån tertiära) bevis för biologisk nedbrytning av oljeprodukter har registrerats. NS kan inte utnyttjas som enda reningsmetod och området bör således inte övergå till KNS. Resultaten har dock potential att utnyttjas som ett underlag vid fastställande av acceptabla sluthalter för området.

Genom att beräkna intransporten av elektronacceptorer och koppla detta till dokumenterade nedbrytningsprocesser kan en översiktlig bild av den kontinuerliga reduktionen

erhållas. Detta innebär att man kan lämna en del föroreningar kvar i området – dessa kommer då att brytas ned och också reduceras genom andra NS-processer. Det kan vara möjligt att beräkna vilka halter som kan accepteras i området för att erhålla en stabil föroreningsplym samt tiden när detta uppnås.

Isotopkvoter av kol ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) är en användbar indikator för biologisk nedbrytning av petroleumprodukter. Det faktum att bakterier "föredrar" den lättaste isotopen ^{12}C i nedbrytningsprocessen gör att en petroleumprodukt som brutits ned under en tid uppvisar en förskjutning i den naturliga isotopsammansättningen. Andelen ^{13}C och ^{14}C blir större i förhållande till ^{12}C . Denna förskjutning kan då också spåras i motsatt förhållande i koldioxid från den fullständiga mineraliseringsprocessen av petroleumprodukten. Med kolisotopanalys av fri fas av produkten och den produkt som utsatts för nedbrytning samt korrelation med isotopsammansättningen i löst koldioxid från nedbrytningsområdet kan således direkt mätbara bevis på biologisk nedbrytning påvisas. Den analysteknik som används baseras på masspektrometri och med tillräcklig upplösning i instrumentet kan isotoperna kvantifieras med stor noggrannhet. Genom att kombinera masspektrometern med en gaskromatograf kan kol från specifika föreningar såsom bensen, toluen, etylbensen och xylen analyseras separat. Genom att använda en produkt med anrikad kvot av ^{13}C kan effekten från nedbrytningsprocessen förstärkas ytterligare. En sådan metod skulle då kunna användas för *in situ*-mätningar av nedbrytningshastigheten genom tillsats och uttag av anrikad produkt i en grundvattenbrunn, ett s.k. "push-pull test". Ett sådant test skulle även ha stor användbarhet vid *in situ* saneringar med stimulerad naturlig nedbrytning, då nedbrytningshastigheten kan mätas i enskilda brunnar före och efter tillsatser av t.ex. syre eller närsalter.

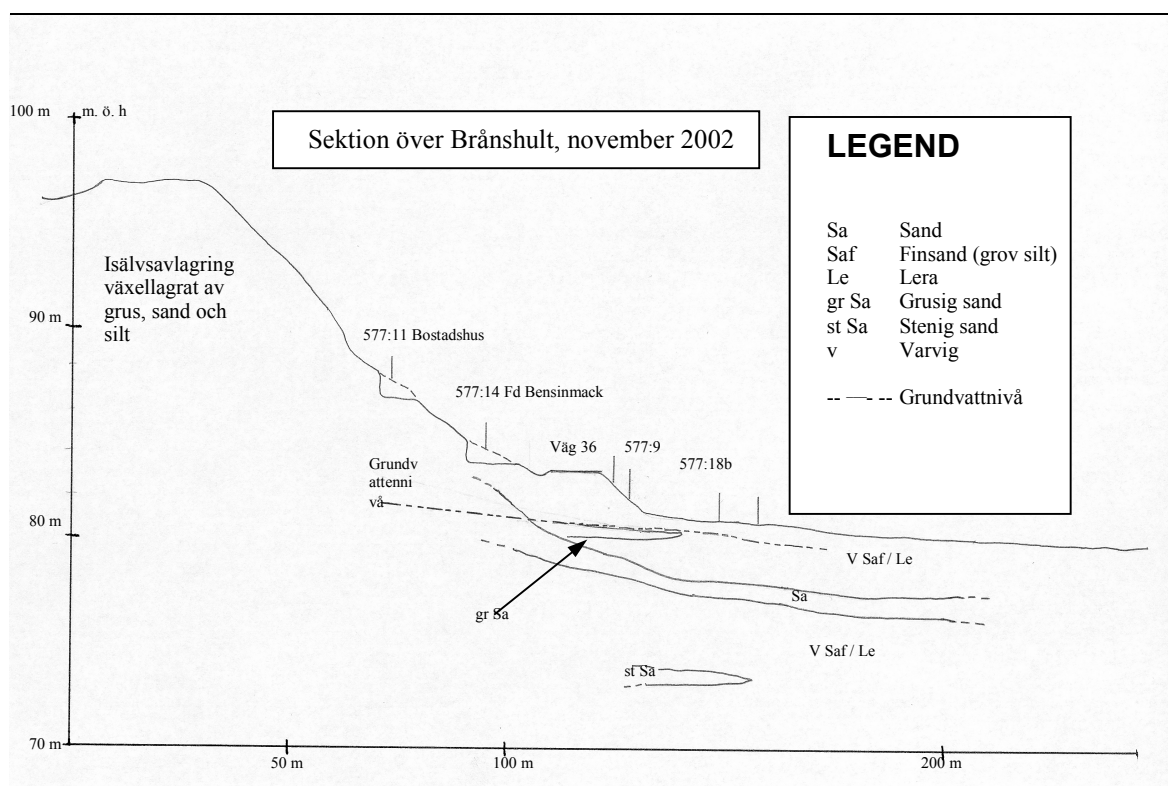
4.2 Brånshult

Det undersökta området utgörs av en nedlagd bensinstation med kringliggande mark belägen i Brånshult ca 15 km öster om Motala. Den aktuella bensinstationen var i drift mellan 1964 (ev. tidigare) och 1985 med försäljning av blyad bensen, diesel och gasol. Svenska Shell ägde installationen. Totalt har 8 cisterner funnits i anslutning till aktuell bensininstallation, vilken var placerad vid platsen för gatuköket. I en miljöundersökning 1999 (SGI – rapport 2-9810-577) konstaterades att området var kraftigt förorenat av BTEX. Fastigheten ligger inte inom skyddsområde för allmän vattentäkt, men är belägen på slutningen av en öst-västlig, ryggformad isälvsavlagring, ca 85 möh. Isälvs materialet överlagras i söder av finsand och lerig silt.

SPIMFAB hade tidigare tagit initiativ till en undersökning och stod också för efterbehandlingen som slutfördes i mars år 2000 med omfattande uppgrävning av de mest förorenade massor, totalt ca 130 ton (90 m^3) och transport av dessa till Gärstad avfallsanläggning för behandling genom kompostering (SGI, 1999). Föroreningarna hade emellertid spritt sig under vägen och vissa (små mängder) förorenade jordmassor lämnades kvar. Området har därefter utnyttjats för övervakning av naturlig självrening. Inga installationer påträffades under grävarbetet, förutom en bottenplatta med spännband till fyra cisterner, se figur 3. En geologisk sektion genom området återges i figur 4.



Figur 3. Väg 36 går framför byggnaderna i övre delen av bilden (se vägbanken och gatljuset). Till vänster i bild syns kioskbyggnaden som låg vid den gamla bensinstationen. Foto från april 2001. Föroreningarna var spridda några 10-tals meter nedanför vägen (ängsområdet på bilden).



Figur 4. Geologisk sektion genom undersökningsområdet i Brånshult. Sektionen sträcker sig från NO (till vänster) till SO (höger). I sektionen har grundvattenrör med beteckningar angetts liksom grundvattennivån för november 2002.

4.2.1 Utförda undersökningar

Provtagning har utförts vid sex tillfällen. Det första tillfället utfördes innan aktiv sanering. Varje provtagningsomgång har utförts under 2-3 fältdagar, med provtagning av totalt 9-11 grundvattenrör (antal beroende av när provtagning skett samt parameterval och tillgång på grundvatten). Mätning av grundvattennivåer har i allmänhet utförts under en dag föregående själva provtagningsomgången. Några mätningar av nivåerna har dessutom skett mellan några av provtagningsomgångarna.

Vid provtagning användes bladderpumpar för att möjliggöra pumpning med lågt flöde (sk "low flow Micropurge") och begränsa grundvattnets kontakt med luft. Se vidare 3.1.1.



Figur 5. Provtagning med bladderpump och mätning med flödescell.

4.2.2 Modellering

Modellering av nedbrytningsförloppet har utförts med programmet Bioscreen som finns tillgängligt utan kostnad på US EPA:s hemsida. Prognostisering av naturlig självrening i grundvattnet inkluderar hänsynstagande till biologisk nedbrytning av dess innehåll av petroleumprodukter. Nedbrytning av BTEX kan i huvudsak anses ske antingen enligt 1:a (alt. pseudo 1:a) ordningens förlopp eller enligt sk "Instantaneous reaction", nedan kallad *momentan nedbrytning*. I det förra fallet är nedbrytningen i princip enbart beroende av föroreningskoncentrationen enligt $C=C_0e^{-kt}$, dvs reduktionstiden $t = -\ln(C/C_0)/k$ (C_0 startkoncentration, C aktuell koncentration och k reduktionskonstanten). I det senare

fallet, dvs momentan nedbrytning, är nedbrytningen beroende av tillgång och nyttjande av sk elektronacceptorer. Differensen av elektronacceptorer uppströms och i det förorenade området plus deras tillflöde ger graden av deras tidsmässiga nyttjande

4.2.3 Slutsatser från Brånshult

Undersökningarna i Brånshult har pågått under 3 år och slutsatserna har sammanfattats enligt nedan:

Efter sanering har halter av bensen (B), toluen (T), etylbensen (E) och xylen (X) förekommit i ett grundvattenrör över rekommenderade riktvärden (MKM GV) vid samtliga provtagningsstillfällen. I ytterligare ett grundvattenrör har B, E samt X förekommit över riktvärdena vid fyra tillfällen. I ytterligare ett rör ertappades bensen vid ett tillfälle över riktvärdet. De övergripande tidsmässiga trenderna för halterna BTEX är att de är avtagande. Föroreningsplymen retarderar.

Erhållna analysdata av BTEX visar avsevärd haltvariation under projektets tidsperiod. Den övergripande tidsmässiga trenden är dock att halterna minskar i alla mätpunkter som förorening ursprungligen ertappats i. Förorening förekommer i en smal zon, högst 10 meter i bredd och mellan 20-30 meter i längd. Undersökningarna visar att föroreningsplymen retarderar. Föroreningsplymen förväntas successivt krympa mot f.d. bensinstationsområdet vid norra sidan om väg 36. Föroreningsplymen, bestående av främst sk lätta aromater, bedöms inte utgöra någon framtida risk för recipienter och eventuella grundvattentäkter.

Den naturliga självreningsprocessen i området består till avsevärd del av mikrobiell nedbrytning av petroleumprodukter, baserat på framtagna primära, sekundära samt tertiära delbevis. Dessa inbegriper bland annat markant ökat nyttjande av elektronacceptorer i området där förorening föreligger, jämfört med omkringliggande områden, en trend av minskande halter BTEX över tiden i detta område samt detekterad förekomst av mikrobiella nedbrytningsprodukter från några, i området existerande, petroleumkonstituent. Områdets assimilativa kapacitet är god och ligger på i medeltal ca 13 mg C₈H₁₀ per liter tillfört grundvatten, samt uppvisar i medel en ökning med tiden.

De avsevärda haltvariationer av BTEX som Brånshults grundvatten uppvisat under provtagningsperioden, genererar signifikanta osäkerheter i prognostiserad saneringstid. Baserat på nyttjande av indata av medelhalter av de fem haltbestämningarna under den drygt 2 ½ år långa testperioden, ger prognosering med momentant reaktionsförlopp (baseras på att mikroorganismerna nyttjar förekommande elektronacceptorer för nedbrytning omedelbart; tillgången på acceptorer är alltså begränsande faktorn) att grundvattnet preliminärt når under BTEX riktvärden år 2008. Alternativt, baserat på teori om total reduktion enligt 1:a ordningens förlopp (reduktionshastigheten enbart beroende av halt; BTEX halten är här den begränsande faktorn) med medelvärden av semi-logarimerade haltvariationer som funktion av tiden, prognoseras området nå under BTEX riktvärden år 2015. Det sistnämnda alternativet har dock statistiskt störst osäkerhet. Med fokus på applicering av kontrollerad naturlig självrening i området bedöms dock båda dessa sluttider som miljömässigt acceptabla med hänsyn till nuvarande markanvändning.

Förenklat riskbaserat synsätt bör appliceras på området, vilket kan resultera i att området kan friskrivras innan alla provpunkter nått under riktvärdena och att området kan övergå från NS till KNS.

5 FÖRUTSÄTTNINGAR FÖR NATURLIG SJÄLVRENING I SVERIGE

Resultaten från genomförda pilotstudier har bekräftat att processerna för NS är verk-samma i svenska jordar. Såväl primära som sekundära och i någon mån tertiära bevis för biologisk nedbrytning har registrerats främst i Brånshult men också i Sollentuna. Den assimilativa kapaciteten med avseende på petroleumprodukter har befunnits vara signifikant såväl i Brånshult som i Sollentuna. Vi har vidare funnit intermediärer som kan hänföras till nedbrytning av BTEX. Den samlade assimilativa kapaciteten har be-räknats till omkring 15 – 20 mg/l i inströmmande grundvatten. Erfarenheten har dock visat att den verkliga assimilativa kapaciteten ofta är betydligt högre än den beräknade.

Biologisk nedbrytning av petroleumprodukter är beroende av grundvattentemperatur. Det svenska klimatet innebär en grundvattentemperatur som är lägre än i många länder som tillämpar NS och KNS. Våra undersökningar visar dock att signifikant biologisk aktivitet pågår även i Sverige, vilket är i linje med nyare forskning som visat att biolo-gisk nedbrytning av petroleumprodukter kan ske även i arktiskt klimat (se t.ex. Whyte et.al 1998; Knobloch et.al 1999; Coulon & Delille 2003)

I Brånshult är föroreningsplymen krympande och BTEX-halten i området beräknas un-derskrida gällande riktvärde om ca 5-10 år. Brånshult kan sägas ha övergått från NS till KNS. I Sollentuna finns fortfarande stora mängder oljeföroreningar kvar i marken och grundvattnet. Föroreningsplymen har inte kunnat konstateras krympa och NS kan inte förväntas rena området under överskådlig tid.

Erfarenheterna från de båda pilotstudierna kan sammanfattas i följande punkter:

- Det är mycket viktigt att skaffa sig en god geologisk och hydrogeologisk modell över det studerade området. Grundvattenflöde och transport av elektronacceptorer är kritiska faktorer för NS och data måste tolkas mot bakgrund av platsens geologiska uppbyggnad. Konceptuella geologiska och hydrogeologiska modeller bör upprättas i projektets inledning och successivt förfinas efterhand som mer data blir kända.
- Grundvattennivåer liksom koncentrationer av elektronacceptorer varierar en hel del över året och det är därför viktigt att provtagning sker varje kvartal under NS-undersökningens inledande år. Efter två år kan provtagningsfrekvensen normalt minska.
- Föroreningsplymen måste avgränsas i tre dimensioner. Grundvattenrör kan sättas på flera nivåer men vid mer omfattande NS-undersökningar, speciellt i områden med komplexa hydrogeologiska förhållanden, kan multi-level rör vara att föredra. Dessa har dock nackdel av att vara förhållandevis kostsamma.
- Fältundersökningen måste planeras noggrant och anpassas till NS-undersökningen. Ett förorenat område blir ofta känt genom en inledande MIFO-inventering som hu-vudsakligen omfattar sammanställning av historiska data om verksamheten på plat-

sen. Inledande markmiljöundersökningar görs för att få en säkrare bild av situationen. Det kan vara frestande att försöka utnyttja tidigare installerade grundvattenrör också för NS-undersökningen. Vår erfarenhet är dock att det kan vara väl så rationellt att planera ett helt nytt fältområde vid inledningen av NS. Grundvattenrören måste anpassas efter NS-undersökningen. Däremot kan fältinstallationer från NS utnyttjas vidare, t.ex vid behov av aktiv sanering.

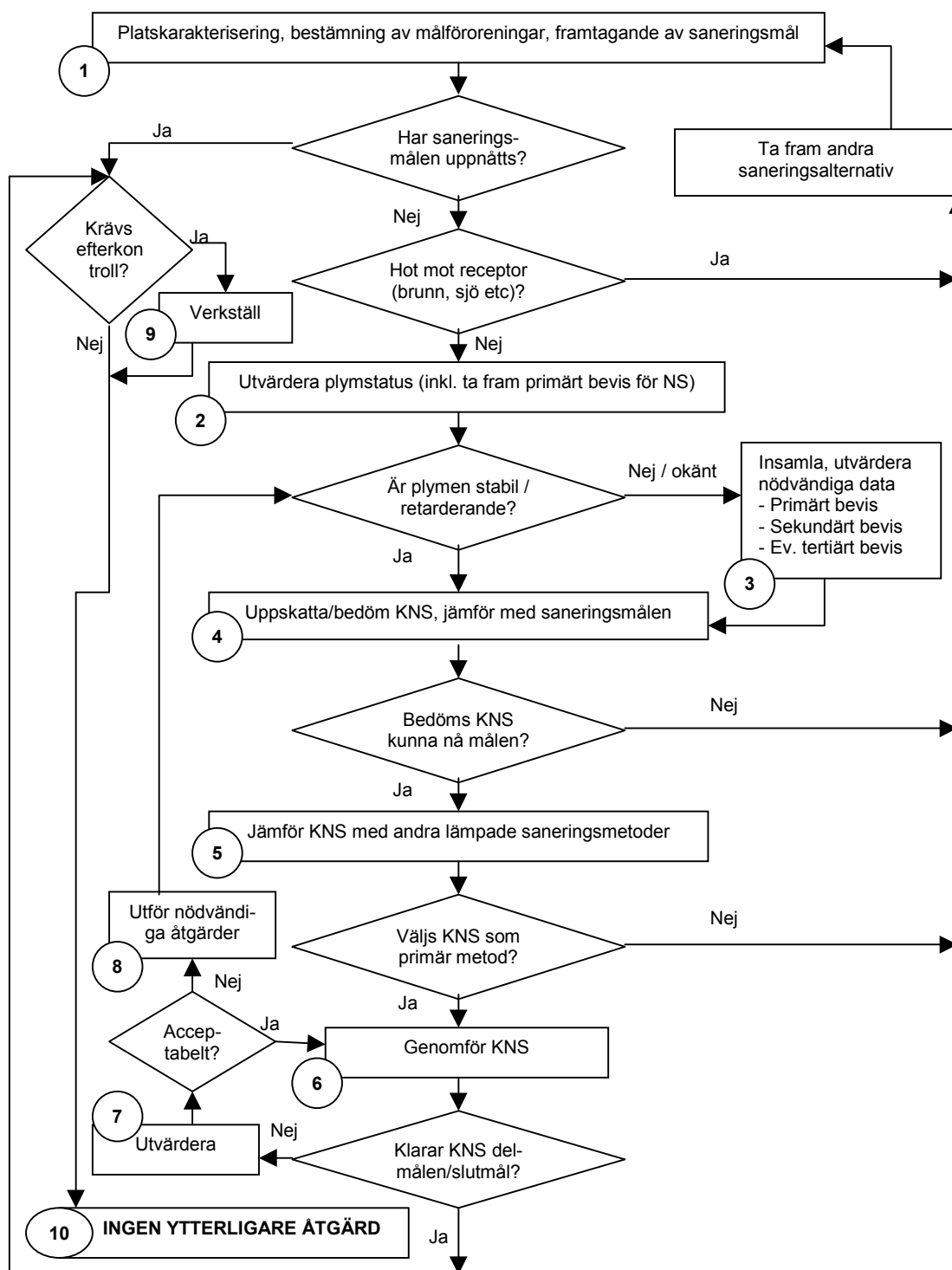
- Resultaten från NS undersökning kan användas för flera ändamål. Prognostisering av föroreningsreduktion är ett huvudsyfte men resultaten kan också utnyttjas vid val av acceptabla saneringsnivåer för ett område där också andra saneringsåtgärder appliceras (förutsatt att de geohydrologiska förutsättningarna inte försämras).
- Om NS-undersökningen visar att KNS inte kan appliceras är de genomförda undersökningarna ändå användbara – för val och design av aktiva saneringsmetoder. NS undersökningen ger, förutom om grundvattennivåer och förorenings-spridning också besked om pH, redox, syrehalt och övriga elektronacceptorer. Detta tillsammans med uttolkningen av den biologiska aktiviteten i området är viktigt underlag för alla typer av saneringsmetoder.
- Den utnyttjade fältmetodiken, med bladderpumpar och flödescell har visat sig fungera bra. Metoden är någorlunda fältmässig, men kräver att utrustningen sköts och hanteras på ett noggrant och korrekt sätt.

6 VÄGLEDNING FÖR UTFÖRANDE AV NATURLIG SJÄLVRENING I SVERIGE

En vägledning för utförande av naturlig självrening under svenska förhållanden har tagits fram i rapporten, *Larsson, L., Lind, B. 2004: Vägledning, Naturlig självrening av petroleumförorenade markområden. SGI-rapport*. Nedan följer utdrag ur denna rapport – för detaljerade beskrivningar av undersökningar, analyser och tolkningar hänvisas till Vägledningen.

Det primära målet med all undersökning av naturlig självrening (NS undersökning) är att ta fram underlag som kan användas för beslut om naturlig självrening i form av saneringsmetod, sk kontrollerad naturlig självrening (KNS), är lämpad för det förorenade området eller ej. För att KNS skall kunna beaktas skall resultaten från NS undersökningen visa att de naturliga processerna reducerar föroreningshalterna med acceptabel hastighet till under de platsspecifika riktvärden som ansvarig miljömyndighet angivit. Därtill skall resultaten visa att föroreningen under processens gång inte kommer att utgöra oacceptabel risk för människa och miljö. Undersökningen kan utföras under en begränsad tid, vars längd beror på platsspecifika förhållanden, men resultaten skall vara av sådan art att de klart visar hur föroreningens framtida öde ter sig tills uppsatta riktvärden nås. Detta kräver att relevant modellering utförs utifrån erhållna platsspecifika data som visar den framtida förorenings-situationen tills föroreningen är naturligt sanerad. Både modelleringsverktyget (normalt någon typ av datormodell), dess indata och själva modelleringsutförandet måste väljas och utföras med omsorg så att resultaten ger relevanta bevis för föroreningens framtida öde.

Nedanstående figur, 6, visar ett flödesdiagram som översiktligt beskriver flödet (konsekutivt) av de olika delmomenten för relevant bedömning av NS och genomförande av KNS. Förklaring till inringade siffror ges i texten nedan.



Figur 6. Flödesschema för NS och KNS processen (ASTM, 1998, delvis modifierad). Förklaring till inringade siffror ges i texten nedan.

- 1 Platskaraktisering utförs för att kunna ta ett första inledande beslut avseende saneringsbehov utifrån saneringsmål. Om sådant bedöms föreligga kan då NS överhuvud taget övervägas i ett första steg eller utgör föroreningen akut hot eller föreligger fri produkt etc (se avsnitt 3.1)? Häri ligger naturligt att ta fram konceptuell markmodell för området.
- 2 Plymen med löst petroleumprodukt karakteriseras utifrån historiska data. En viktig del är att klarlägga om plymen är stabil, minskar eller ökar i omfång. De historiska data ska vara designade för att kunna nyttjas i det sk primära beviset (avsnitt 4.2).
- 3 I de fall primära beviset inte är klart och entydigt, behövs mer undersökningar utföras och mer bevis införskaffas. Primära beviset kanske inte tillräckligt entydigt visar att plymen retarderar eller är stabil (alltför lågt värde på den deterministiska koefficienten) beviset kanske inte tillräckligt tydlig ger indikation på signifikant biologisk nedbrytning etc. Härvid krävs att även det sk sekundära beviset samt i absoluta undantagsfall eventuellt därtill det tertiära beviset inkluderas.
- 4 Bedömning av pågående NS-process i ett område utgår från plymens beteende (expansion, stabil, krymper), reduktionshastighet av förorening i grundvattenplymen samt indikationer på biologisk nedbrytning av förorening i plymen. Denna kan bedömas utifrån relativt enkla beräkningar. KNS kan generellt accepteras vara en potentiell saneringsmetod om plymen krymper eller är stabil (primärt bevis) samtidigt som föroreningen inte utgör akut hot mot sin omgivning. Med potentiell menas här enbart ur miljösynpunkt. I vissa fall kan KNS vara lämpad fastän plymen expanderar, förutsatt att man kan visa att plymen minskar sin framtida expansion så pass mycket att plymen aldrig kommer att utgöra något nedströms hot. Ofta läggs ytterligare restriktioner på KNS, framför allt att saneringsmål skall nås inom viss tid. Därvid kan potentialen för KNS radikalt minska; uppsatt tid kan innebära att varken stationär eller expanderande plym kan komma ifråga. I vissa fall kan dock expanderande plym ha större potential än stationär dito. Detta gäller speciellt om utsläppet är relativt färskt men begränsat. Ett tillfälligt utsläpp kan i början resultera i en expanderande plym, men om källan är borttagen finns god potential att plymen så småningom börjar retardera. En restriktion är här att plymen under sin temporära expansion inte får nå recipient, dvs föroreningen får inte utgöra vare sig aktuellt eller framtida hot, samt om krav på saneringstid föreligger att retardationen sker i tillräcklig omfattning. Bedömning av expanderande plym utförs lämpligen med datormodeller. Det kan även relativt enkelt beräknas matematiskt (Lovanh, 2000).
- 5 När väl bedömning gjorts att KNS har potential att nå uppsatta saneringsmål jämförs lämpligen KNS med andra saneringsmetoder. Härvid bör beaktas, förutom sådan potential, metodernas saneringstider, riskreducering inkl. exponering vid t ex sanering, kostnadseffektivitet och tekniska begränsningar samt myndighetskrav och markutnyttjande.
- 6 Då KNS har valts som saneringsmetod är det nödvändigt att ta fram och implementera en provtagningsplan som ger adekvat information om hur framåtskri-

dandet av KNS går avseende uppsatta saneringsmål. Härvid är det lämpligt att sätta tidsbestämda delmål för KNS. Den mest kostsamma delen av KNS är provtagning och analyser. Härvid är det viktigt att provtagningsplanen är optimal utifrån både kostnadseffektivitet och relevant utvärdering av beviskraven för KNS. Det sistnämnda inkluderar bl a optimal provpunktsplacering, inte minst för att säkerställa att plymen inte utgör, och inte kommer att utgöra, något hot mot omgivning. Genomförandet av KNS kan bl a innebära att ytterligare provpunkter bör placeras ut i förhållande till vad som förelåg under NS-undersökningen, allt för att så optimalt som möjligt följa och prognosera framskridandet av KNS. Därtill, i möjligaste mån bör en plan tas fram innan KNS startar innefattande utformning av alternativa saneringsaktiviteter i det fall KNS under utförande visar sig fallera.

- 7 Har delmål satts kan dessa t ex innefatta att halter i förbestämda mätpunkter skall ha reducerats vissa procent efter vissa förbestämda tider. Uppfyllande av sådana delmål kan beräknas och utvärderas. Om något delmål inte uppfylls genomförs först en utvärdering av om detta är temporärt betingat (t ex ovanliga variationer i gv-nivåerna som temporärt påverkat halterna). Om orsak inte kan hänföras till oväntat temporärt krävs en mer ingående prognosering av föroreningsutbredningen. Sådan får då utföras med datoriserat prognosverktyg. Det kan därefter visa sig att uppställda saneringsmål (delmål och/eller slutmål) endast behöver en mindre revidering. Hur stor revidering som kan accepteras får tas av ansvarig miljömyndighet, i samråd med markägare.
- 8 Visar resultaten att KNS i fortsättningen inte kommer att vara adekvat för området, i det utförande som föreligger, måste KNS design revideras eller i värsta fall nyttjandet av KNS i området helt omvärderas. En alternativ aktionsplan måste tas fram (helst skall denna tagits fram redan när det togs beslut att genomföra KNS, se punkt 6 ovan). Reviderad design av KNS kan till exempel innefatta a/ ytterligare bortgrävning av förorenad jord i omättad och/eller mättad zon innan KNS fortsätter, b/förstärkt naturlig självrening ("Enhanced Natural Attenuation"), dvs att med aktiva åtgärder stimulera den naturliga nedbrytning in situ eller c/inneslutning/nedgrävning av barriär med efterföljande KNS eller d/ mer rigorösa kontroller. Behov kan alternativt föreligga att sätta in någon eller några aktiva in situ metoder på en del av området och låta KNS verka i resterande delområde. I värsta fall får andra saneringsmetoder helt ersätta KNS (i detta fall är inte nästa steg att gå in i loopen som visas i figur 6 istället gäller "Ta fram andra saneringsalternativ", i övre höger del av figuren).
- 9 I de fall saneringsmålen uppnåtts kan det ibland föreligga behov av efterkontroll för att säkerställa att området även på längre sikt tillfredsställer målen, innan man kan ta beslut om att inga ytterligare åtgärder är nödvändiga och området kan återlämnas till naturen.
- 10 Med "Ingen ytterligare åtgärd" menas att ingen ytterligare undersökning är nödvändig samt att området kan återlämnas till naturen. Här förutsätts att de plats-specifika riktvärden som satts (baserade på riskbedömning och eventuellt i kombination med riskvärdering) har nåtts inom accepterad tidsram (förutsatt tidsmässiga mål). Slutligt beslut att denna punkt kan realiserats tas av ansvarig miljömyndighet. Det är härvid viktigt att myndigheten dessförinnan erhållit komplett

underlag för att sådant beslut kan fattas. Sådant underlag innefattar klara bevis på att delmål och slutmål nåtts. Tidigare accepterad prognos överensstämmer nu tillfredsställande med reella data, primära beviset och ofta hela/delar av sekundära beviset föreligger (tertiärt bevis sällsynt). Att åtgärdsmålen har uppnåtts innebär alltså bl a att halterna i grundvatten nått ned till accepterade nivåer. En fördel med KNS är att områdets naturliga självrening även fortsättningsvis kommer att pågå varvid dessa nivåer sänks ytterligare. Sammantaget, kriterier för ”Ingen ytterligare åtgärd” bör vara

- Det finns ingen påverkan på recipienter och det finns heller ingen potential för sådan påverkan.
- Saneringsmålen har nåtts eller det har otvetydigt visats att KNS kommer att fortsätta så att saneringsmålen nås.
- Föroreningsplymen minskar eller är stabil.
- Vid behov, institutionell kontroll av områdets KNS pågår och upprätthålls.

6.1 Kriterier för utnyttjande av KNS

I detta kapitel ges förslag till kriteriepunkter som bör vara uppfyllda inför beslut hos ansvarig miljömyndighet avseende att genomföra kontrollerad naturlig självrening (KNS).

KNS bör kunna föreslås som saneringsmetod om utvärdering av föregående NS-undersökning, med hjälp av primära bevis eller vid behov genom både det primära och det sekundära beviset, visat att metoden är teknisk möjlig. Därtill bör alltså, för att KNS ska ha potential att kunna appliceras som saneringsmetod på aktuellt område, någon av följande två kriterier (Kriterier 1 eller Kriterier 2) uppfyllas. De flesta ingående delarna i dessa kriterier bör föreligga redan innan man startar själva NS-undersökningen.

6.1.1 Specifikt Kriterier 1. Efterbehandling KNS

Förutom vad som nedan anges generellt för både Kriterier 1 och Kriterier 2, bör följande gälla specifikt för Kriterier 1 - för att KNS ska kunna föreslås som enda efterbehandlingsmetod.

A/ Det får inte finnas någon saneringsbar fri produkt (här definierad som produktfilm större än eller lika med 1 mm) på grundvattenytan i någon av provtagningsrören.

B/ Det måste visas att följande exponeringsvägar inte utgör någon miljö-/hälsobaserad oacceptabel risk:

- Utläkning/läckage av förorening från omättad jord till grundvattnet får inte ske så att förorening i grundvattnet utgör och kommer att utgöra oacceptabel risk. Förorening i grundvattnet i sig får inte utgöra och inte komma att utgöra oacceptabel risk.
- Ytliggande jord får inte vara förorenad så att den utgör oacceptabel risk.
- Gasavgång från förorening i grundvattnet till inomhusluft får inte utgöra oacceptabel risk.

- Gasavgång från förorening i omättad zon till inomhusluft får inte utgöra oacceptabel risk.

C/ Föroreningsplymens utbredning måste vara känd samt befinna sig inom den fastighetsgräns vars ägare tillsammans med ansvarig miljömyndighet godkänt NS undersökning för. Plymens utbredning idag får inte utgöra oacceptabel risk inom fastighetsgränsen angivet under B ovan samt det får inte finnas potential att plymen expanderar utanför fastighetsgränsen.

Det får inte finnas någon exponeringspunkt där mottagare (här främst människa) kan antas kunna bli exponerad, förutsatt att förorening når dit. Sådan punkt kan vara

- fastighetsgränsen inom vilken förorening idag föreligger
- yttjord som kan utgöra risk för exponering hos mottagare via dermal kontakt, inhalation eller oralt intag
- förråd, uthus, busskurer etc som har utrymme/korridor i vilken mottagare kan vistas och bli exponerad för föroreningsångor
- byggnader, med eller utan källare
- brunnar o dylikt (ej provtagningsrör för NS/KNS) vars vattenuttag nyttjas till bevattning, konsumtion
- ytvatten (dammar, bäckar, sjöar etc) som kan utgöra risk för exponering hos mottagare via dermal kontakt, inhalation eller oralt intag
- miljökänsligt område utan ytvatten, brunn, vattendrag etc men med mer stringent lagstiftning, t ex naturskyddsområde, nationalpark, riksintresse etc.

D/ En reservplan för alternativ saneringsmetod har tagits fram som säkerhet om KNS skulle falla. Detta gäller speciellt i det fall uppsatta delmål inte nås samtidigt som tillhörande mer avancerade modelleringsberäkningar indikerar saneringsresultat som fastighetsägare/ansvarig miljömyndighet inte accepterar. I denna reservplan kan behöva ingå pilottest, kortfattad bedömning av föreslagna metoders kostnader och teknisk lämplighet. Eventuellt kan därtill krävas detaljerade ritningar för det alternativa saneringssystemet.

6.1.2 Specifikt Kriteria 2. Efterbehandling generellt.

Förutom vad som nedan anges generellt för både Kriteria 1 och Kriteria 2, gäller specifikt för Kriteria 2 följande.

A/ Detta kriterium gäller som alternativ till Kriteria 1 i det fall någon av punkterna för Kriteria 1 inte är uppfyllt, exklusive punkt C:s del avseende fastighetsgräns.

B/ Jämförelse/utvärdering av KNS mot förslagsvis två-tre andra alternativa saneringsmetoder som valts ut i en primär screening av lämpliga saneringsmetoder. Oavsett om KNS under tiden visar sig inte kunna nå uppsatta saneringsmål bör alternativa saneringsmetoder tas fram. Därtill bör tas fram dessa metoders ekonomi samt bedömning av hur väl dessa metoder kan nå uppställda saneringsmål. Häri bör beaktas behov av sanering, inte bara grundvatten utan även, av jord och fri produkt.

6.1.3 Generellt Kriteria 1 och Kriteria 2.

Av ovan framgår att en utvärdering måste utföras som identifierar alla de exponeringspunkter (se ovan) / exponeringsvägar som utgör exponeringsrisk, både redan påverkade, och de som har potential att bli påverkade, av föroreningen. Dessutom krävs generellt:

A/ Framtagning av saneringsmål. Dessa kan teoretiskt tas fram på olika sätt (generella, platsspecifika utifrån förbestämd bedömningsmall, risk/osäkerhetsbaserad bedömning, riskvärdering etc). Målen sätts i samråd med ansvarig miljömyndighet.

B/ Uppskattad saneringstid och ansättande av delmål. Uppskattad tid tills kvarvarande förorening i varje enskild provtagningspunkt i grundvattnet, inklusive hotspot, kommer att motsvara delmålet 75 % reduktion från det att KNS saneringen startade, bör inte överstiga förslagsvis 10 år (får bedömas från fall till fall av ansvarig miljömyndighet, 10 år bör dock vara en rimlig generell tid). Hur detta kan uppskattas ges som exempel i Vägledningen. Saneringsmål avseende sluthalter i hela akvifären och när dessa sluthalter ska ha uppnåtts sätts platsspecifikt av ansvarigt myndighet. Alternativt bör ett riskbaserat saneringsmål kunna sättas vid behov.

Om inte uppsatta mål avseende sluthalter, baserat på beräknade av totala halveringstider i alla grundvattenrör nås måste fortsatt applicerande av KNS omvärderas. Detta kan vid behov/acceptans inkludera eventuell justering av tidsbasen för saneringsmålen, baserat på en mer ingående modellering av föroreningens framtida öde.

Exempel på tänkbara orsaker till varför KNS måste omvärderas behöver inte enbart vara på att reduktion av förorening i grundvattnet går med lägre hastighet än vad som satts i delmålen. Det kan även bero av andra orsaker. Exempel på andra orsaker som kan trigga omvärdering av KNS är:

- En exponeringspunkt har blivit förorenad under processens gång med tillhörande icke acceptabel risk som följd.
- Plymen visar sig börja expandera (inte enbart tillfälligt utan enligt tydlig trend).
- En exponeringspunkt som tidigare inte fanns har nu etablerats och visat sig utgöra oacceptabel risk (t ex ett hus har byggts på området nedströms).
- Markanvändningen har ändrats (t ex från MKM till KM).
- Fri produkt uppenbarar sig / detekteras (t ex > 1 mm tjockt lager på gv-ytan).
- KNS har under tiden blivit avsevärt dyrare än vad som initialt bedömdes.

C/ Provtagningsplan för grundvatten behövs redan inledningsvis i NS-undersökningen. I det fall KNS godtas kan denna behöva kompletteras med någon/några ytterligare provpunkter för att säkerställa att plymen inte expanderar, ändrar riktning etc.

Undersökningen inkluderar provtagning under både NS-undersökningen och under efterföljande KNS sanering. För NS bör provtagning ske under minst fyra på varandra följande kvartal. För KNS bör provtagning utföras under minst åtta på varandra följande kvartal men i dessa kan ingå de provtagningsomgångar som ingår under NS. Detta totala minimum av åtta omgångar bör enbart gälla då man efter de fyra första provomgångarna visat att området kommer att vara sanerat inom ett år (KNS avslutas lämpligen alltid med fyra kvartalsvisa provomgångar). Kommer KNS att ta mer än ett år bör det

tredje året innefatta provtagning halvårsvis och läggas in under året så att provtagningsresultaten visar koncentrationsförändringar över tiden (alltså de läggs tidsmässigt inte alltför tätt inpå varandra). En av dessa omgångar måste läggas under den del av året som föregående provdata visar genererar högst koncentration.

Vid behov följs detta av årsvisa provtagningar fram till det år man dessförinnan visat, genom halveringstidsberäkningar eller datormodellprognosering, att området kommer att vara sanerat. Det året slutförs provtagningarna med kvartalsvis provtagning. Detta sista år skall maxhalten under året inte överstiga uppsatta saneringsmål. Om så ändå sker måste provtagning fortsätta kvartalsvis inkluderande det kvartal som provtagningarna tidigare visat generera högst totalhalt i grundvattnet.

När områdets grundvatten nått halter under uppsatta saneringsmål kan området återlämnas till naturen, efter beslut av ansvarig miljömyndighet.

Under KNS-fasen bör normalt inte krävas analys av fler parametrar än vad som motsvaras av det primära beviset. Detta innebär att analyserna bör kunna begränsas till BTEX, TPH, oljeindex, löst syre, temperatur, pH och konduktivitet. Under den inledande NS-undersökningen däremot kan behov föreligga att inkludera fler bevis.

Naturligtvis förutsätts att det inte finns andra organiska föroreningar i grundvattnet än kolväten och oxiderade kolväten. KNS-saneringen är fokuserad på dessa föreningar. Skulle MTBE föreligga kan KNS endast säkerställa att petroleumkolvätena har sanerats, inte MTBE. För MTBE krävs separat undersökning och eventuellt separat aktiv sanering (dock finns indikationer på att MTBE under vissa omständigheter bryts ned mikrobiellt och skulle då kunna genomgå NS-undersökning; observera KNS kan endast tillåtas då signifikant del av den naturliga självreningprocessen består av biologisk nedbrytning).

7 EFTERORD

Naturlig självrening omfattar en rad naturligt förekommande processer som bryter ned och begränsar transporten av organiska ämnen i mark och grundvatten. Metodiken med NS, KNS (kontrollerad naturlig självsanering) och FNS (förstärkt naturlig självsanering) har i vissa länder utnyttjats under flera år. Ett huvudfokus för många projekt, liksom pilotstudierna i Sollentuna och Brånshult, har varit saneringen av BTEX. Naturlig självrening omfattar dock också många andra ämnen, t.ex klorerade alifater. Kostnaderna för aktiv sanering av förorenade områden är ofta mycket höga och det är viktigt att hela tiden utveckla och utnyttja den bäst anpassade och ekonomiskt optimala saneringstekniken. Vi menar att KNS bör vara en saneringsmetod också i Sverige. I Sverige finns tusentals petroleumförorenade markområden och många av dem kan vara lämpliga för KNS.

Metodiken för NS kan utvecklas genom ett mer systematiskt utnyttjande av isotoper ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) eller intermediärer. I det senare fallet krävs dock ett utökat samarbete med laboratorier för att få fram standardlösningar med hög kvalitet till rimliga kostnader.

7.1 Implementering

Införandet av ny saneringsteknik kräver en samsyn och acceptans från flera parter, fastighetsägare/problemägare, miljömyndigheterna samt utredare och saneringsansvariga (entreprenör/konsult). Dessutom kan det krävas acceptans hos allmänheten för en tidsmässig utdragen kontrollerad naturlig självsanering.

Bästa sättet att nå ut med implementering av ny teknik är ofta att genomföra testprojekt eller pilotprojekt. Vi hoppas att de genomförda projekten inom detta projekt skall inspirera konsulter att lyfta fram KNS som ett relevant alternativ vid förslag om sanering. På så sätt kommer metoden att få spridning genom konkreta saneringsprojekt. SGI har en skyldighet som statligt forskningsinstitut att bidra med kunskap och erfarenhet.

7.2 Tack till

Projektet har finansierats lika mellan Formas och SGI. Vi vill rikta ett varmt tack till Björn Sellberg, Formas, för engagemang och stöttning i projektet. Varmt tack också till övriga deltagare i referensgruppen för engagemang, ihärdigt läsande och viktiga kommentarer och synpunkter. Tack till Rolf Randborg och Leif Ljung, SPIMFAB, för intresse och viktigt stöd inom de båda pilotstudierna. Slutligen vill vi rikta ett stort tack också till WSP Environmental och Sten Bergström för gott samarbete och tillgång till data från Sollentuna.

8 REFERENSER

- ASTM, 1998. Standard guide for remediation of ground water by natural attenuation at petroleum release sites. American Society for Testing and Materials. ASTM E-1943-98, West Conshohocken, PA
- EPA, 1999. Use of monitored natural attenuation at superfund, RCRA corrective action, and underground storage tank site. Directive number 9200.4-17P.
- Chapelle F., Haack S., Adriaens P., Henry M., Bradley P., 1996. Comparison of Eh and H₂ measurements for delineating redox processes in a contaminated aquifer. Environ. Sci. Technol., Vol. 30, no 12, pp. 3565-3569.
- Coulon, F., Delille, D. 2003: Effects of biostimulation on growth of indigenous bacteria in sub-antarctic soil contaminated with oil hydrocarbons. Oil & Gas Science and Technology – Rev IFP, Vol 58, n° 3, p 469-479.
- Hadley P., Armstrong R., 1991. "Where's the Benzene?". Examining California groundwater quality surveys. Ground Water, v. 29. pp. 35-40.
- Hicks R., Rizvi R., 1996. Do nothing cleanups. Civ. Eng., Sept., 1996, pp. 54-57.
- J&W, Sten Berglund och Jenny Forsberg 2001: SPIMFAB Projekt, Estländaren 10 m fl Sollentuna: Redovisning och utvärdering av "pilotsanering" genom grundvattenpumpning. Stockholm 010613.

- Knoblauch, C., Jörgensen, B.B., Harder, J. 1999: Community size and metabolic rates of psychrophilic sulfate-reducing bacteria in Arctic marine sediments. *Appl. And Env. Microbiology*, Sept. 1999, p. 4230-4233.
- Larsson L., 1998. Jordens renhållningsarbetare till Er tjänst: Naturlig självrening av petroleumprodukter. *Bygg & Teknik*, nr 1, 1998, pp.28-30.
- Larsson L., Forsman M., Lindmark P., 1994. Biologiska metoder för sanering av förorenade markområden. Avfallsforskningsrådet. AFR-Rapport 55.
- Lindmark, P., Larsson, L., 1995. Åtgärdsteknik för oljeförorenad mark. Metoder för efterbehandling och sanering. Naturvårdsverket. SNV Rapport 4445.
- Lovanh N., Zhang Y.-K., Heathcote R., Alvarez P., 2000. Guidelines to determine site-specific parameters for modeling the fate and transport of monohydrocarbons in groundwater. Iowa Comprehensive Petroleum Underground Storage Tank Fund Board, West Des Moines, IA, USA.
<http://www.iowadnr.com/land/ust/technicalresources/monohydrocarbons/documents/monohydrocarbons.pdf>.
- NV 1994. Vägledning för miljötekniska markundersökningar, Del I (rapport 4310), Del II (rapport 4311), Naturvårdsverket
- Office of Underground Storage Tanks, 1990. LUST thrust fund monthly progress report. Office of Underground.
- SGI, 1999. *Statens geotekniska institut, 1999*. Miljöteknisk markundersökning på nedlagd bensinstation. Fastighet Brånshult 2:8, Brånshult Kristberg, Motala kommun. Daterad 1999-11-09. SGI diarienumr 2-9810-577.
- Tulis D., 1998. Issues associated with natural attenuation. USEPA/OUST
<http://www.epa.gov/swerust1/rbdl/issues.htm>
- Whyte, L.G., Hawari, J., Zhou, E., Bourbonnière, L., Inniss, W.E., Greer, C. 1998: Biodegradation of variable-chain-length alkanes at low temperatures by psychrotrophic *Rhodococcus* sp. *Appl. And Env. Microbiology*, July. 1998, p. 2578-2584.



Statens geotekniska institut
Swedish Geotechnical Institute

SE-581 93 Linköping, Sweden

Tel: 013-20 18 00, Int + 46 13 201800

Fax: 013-20 19 14, Int + 46 13 201914

E-mail: sgi@swedgeo.se Internet: www.swedgeo.se