

PT6420

Definitiestudie
Bodemsaneren en paalrot

Definitieve rapportage

Ing. W.J.Braam, Dumea-KBBL (penvoerder)
Ing. A.J.W. Smits, Dumea-KBBL
Dr. R.K.W.M. Klaassen, SHR
Ir. P.J.M. den Nijs, Wareco

Juni 2009

Gouda, SKB

Stichting Kennisontwikkeling Kennisoverdracht Bodem

Auteursrechten

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze opgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of op enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van SKB.

Het is toegestaan overeenkomstig artikel 15a Auteurswet 1912 gegevens uit deze uitgave te citeren in artikelen, scripties en boeken mits de bron op duidelijke wijze wordt vermeld, alsmede de aanduiding van de maker, indien deze in de bron voorkomt, "©"Definitiestudie Bodemsaneren en paalrot – Definitieve rapportage", juni 2009, SKB, Gouda."

Aansprakelijkheid

SKB en degenen die aan deze publicatie hebben meegewerkt, hebben een zo groot mogelijke zorgvuldigheid betracht bij het samenstellen van deze uitgave. Nochtans moet de mogelijkheid niet worden uitgesloten dat er toch fouten en onvolledigheden in deze uitgave voorkomen. Ieder gebruik van deze uitgave en gegevens daaruit is geheel voor eigen risico van de gebruiker en SKB sluit, mede ten behoeve van al degenen die aan deze uitgave hebben meegewerkt, iedere aansprakelijkheid uit voor schade die mocht voortvloeien uit het gebruik van deze uitgave en de daarin opgenomen gegevens, tenzij de schade mocht voortvloeien uit opzet of grove schuld zijdens SKB en/of degenen die aan deze uitgave hebben meegewerkt.

Titel rapport

Definitiestudie Bodemsaneren en paalrot

Definitieve rapportage

SKB rapportnummer

PT6420

Project rapportnummer

PT6420

Auteur(s)

Ing. W.J.Braam
Ing. A.J.W. Smits
Dr. R.K.W.M. Klaassen
Ir. P.J.M. den Nijs

Aantal bladzijden**Rapport:** 13**Bijlagen:** 15**Uitvoerende organisaties (consortium)**

Dumea-KBBL (penvoerder, ing. W.J.Braam en ing. A.J.W. Smits), SHR (dr. R.K.W.M. Klaassen), Wareco (ir. P.J.M. den Nijs)

Uitgever

SKB, Gouda

Samenvatting

In het kader van de problematiek van funderingsschade bij bodemsaneren is een definitiestudie uitgevoerd. Er is bestaande kennis geïnventariseerd om onderbouwd een risico-analyse te kunnen vormgeven. Omdat kennis over deze materie zeer verspreid in de markt aanwezig is, is middels een per e-mail verzonden vragenlijst de relevantie van het probleem getoetst.

Op basis van de resultaten wordt geconcludeerd dat het probleem breed erkend wordt binnen de groep van potentiële eindgebruikers. Naast informatie over verontreiniging, bodemopbouw en saneringstechniek, is het derhalve belangrijk om bij het ontwerp van een saneringstechniek de actuele aantasting in de houten palen in kaart te brengen, alsmede de mogelijke potentiële aantasting in relatie tot de duur van de sanering.

Voor verdere onderbouwing van een risico-analyse dienen hiaten in beschikbare kennis nader ontsloten te worden. Middels een workshop kunnen stakeholders bij elkaar worden gebracht met als doel een antwoord te geven op de gestelde onderzoeksvragen.

Trefwoorden**Gecontroleerde termen:**

in situ
bodemsanering

Vrije trefwoorden:

paalrot
funderingsschade
zettingen

Titel project

Definitiestudie bodemsaneren en paalrot

Projectleiding

Dumea-KBBL
(ing. W.J.Braam, 0570 – 524017)

Dit rapport is verkrijgbaar bij:

SKB, Postbus 420, 2800 AK Gouda

INHOUD

SAMENVATTING

Hoofdstuk	1	INLEIDING	1
		1.1 Aanleiding	1
		1.2 Doelstelling Definitiestudie	2
		1.3 Afbakening van het onderzoek	2
		1.4 Samenstelling consortium	2
		1.5 Leeswijzer	2
Hoofdstuk	2	OPZET EN UITVOERING DEFINITIESTUDIE	3
		2.1 Algemeen	3
		2.2 Opzet van het onderzoek	4
		2.3 Fase 1: Literatuuronderzoek	4
		2.4 Fase 2: Opstellen achtergronddocument	4
		2.5 Fase 3: Toetsen relevantie per vragenlijst via e-mail	5
		2.6 Fase 4: Opstellen rapportage definitieve studie	5
Hoofdstuk	3	RESULTATEN ENQUETE	6
		3.1 Uitvoering	6
		3.2 Resultaten	6
		3.3 Bespreking resultaten enquête	11
Hoofdstuk	4	CONCLUSIES	12
Hoofdstuk	5	AANBEVELINGEN	13
Bijlage	A	Samenvatting: effect van bodemsanering op aantasting van houten heipalen	
Bijlage	B	Processen aantasting houten heipalen	
Bijlage	C	Overzicht gevolgen in de bodem ten gevolge van saneringstechnieken	

SAMENVATTING

Definitiestudie Bodemsaneren en paalrot

In-situ sanering kan heel doelmatig, efficiënt en kosteneffectief zijn. Belangrijk voor het inzetten van deze techniek is een risico-analyse met betrekking tot ongewenste omgevingsbeïnvloeding.

Vanuit de risico-analyse wordt een probleem geconstateerd in relatie tot de oude houten paalfunderingen in de directe omgeving van de sanering. Het is tot op heden niet goed mogelijk de risico's op funderingsschade in te schatten. De beschikbare kennis en ervaring schieten te kort.

Door het SKB is aangegeven dat het onderwerp paalrot ten gevolge van bodemsanering een relevant thema is waarvan geen eenduidige informatie bekend is. Reden voor het SKB om een inventarisatie uit te laten voeren om te achterhalen:

- waar zijn kansen aanwezig om in-situ techniek in te zetten rond houten paalfunderingen;
- waar wordt nu gekozen voor een traditionele saneringsuitvoering omdat het risico voor de houten paalfunderingen niet bekend is;
- waar worden saneringen totaal achterwege gelaten?

Bestaande kennis is verzameld om onderbouwd een risico-analyse te kunnen vormgeven. Omdat kennis over deze materie zeer verspreid in de markt aanwezig is, is middels een per e-mail verzonden vragenlijst onderzocht in welke mate het probleem erkend wordt.

Gebleken is dat kennis met betrekking tot funderingsschade door bodemsaneren verdeeld is over bevoegde gezagen, adviesbureaus en aannemers. Na het analyseren van de gegevens zijn de bevindingen geformuleerd voorzien van figuren.

Gebleken is dat de kennisvragers met betrekking tot dit thema ook verdeeld zijn over bevoegde gezagen, adviesbureaus en aannemers. De wens tot deelname aan een te houden workshop wordt breed gedragen, waarbij men bereid is specifieke kennis in te brengen in het onderzoekstraject.

Geconcludeerd wordt dat het probleem van funderingsschade bij bodemsanering breed erkend wordt binnen de groep van potentiële eindgebruikers. Naast informatie over verontreiniging, bodemopbouw en saneringstechniek, is het belangrijk om bij het ontwerp van een saneringstechniek de actuele aantasting in de houten palen in kaart te brengen alsmede de mogelijke potentiële aantasting in relatie tot de duur van de sanering.

Voor verdere onderbouwing van een risico-analyse dienen hiaten in beschikbare kennis nader ontsloten te worden. Middels een workshop kunnen stakeholders bij elkaar worden gebracht met als doel een antwoord te geven op de gestelde onderzoeksvragen.

HOOFDSTUK 1

INLEIDING

1.1 Aanleiding

Bij het ontwerp van een bodemsanering wordt een analyse gemaakt van de risico's van de technieken die worden toegepast op de betreffende locatie. De risico's van schade aan houten paalfunderingen, als gevolg van het toepassen van (in situ) saneringstechnieken, zijn echter moeilijk in te schatten. In situ bodemsaneringstechnieken hebben tot doel de omstandigheden in de bodem dusdanig aan te passen dat aanwezige verontreinigingen in voldoende mate worden verwijderd. Of dit een katalytisch effect heeft op de degradatie van houten heipalen is nog onvoldoende bekend. Op basis van de beschikbare kennis zou er een effect kunnen zijn maar hierover zijn geen absolute uitspraken te doen.

Door het gebruik van in situ bodemsaneringstechnieken hoeft de infrastructuur niet zo ingrijpend te worden aangetast en deze techniek leent zich dan ook goed voor het (oud) stedelijke gebied. Het lijkt erop dat vaak niet voor in situ bodemsaneringstechnieken wordt gekozen omdat de risico's op schade aan funderingen niet goed kunnen worden ingeschat. Het is daarom belangrijk om te weten hoe vaak het voorkomt dat er andere bodemsaneringstechnieken worden gekozen of zelfs een bodemsanering niet wordt uitgevoerd omdat de risico's niet kunnen worden ingeschat. SKB heeft besloten om in eerste instantie de relevantie van dit onderwerp nader te bepalen. Deze relevantie wordt vastgesteld door een definitiestudie uit te voeren.

1.2 Doelstelling Definitiestudie

De doelstelling van de definitiestudie is “het bepalen van de relevantie in de markt van het thema *paalrot en bodemsanering*”, en zal in kaart worden gebracht door een enquête voor te leggen bij personen en organisaties die op een of andere manier betrokken zijn bij bodemsanering in gebieden waar houten paalfunderingen te verwachten zijn.

Op basis van de uitkomsten van de enquête kan de behoefte en zin voor een eventuele vervolgfase op deze studie worden bepaald.

1.3 Afbakening van het onderzoek

Door het Kennis Integratie Team (KIT) van SKB is het gebrek aan inzicht tussen de inzet van in situ bodemsanering en het effect op houten paalfunderingen reeds als probleem vastgesteld. Om een indruk te krijgen over het draagvlak van dit probleem binnen de groep van potentiële eindgebruikers is een vragenlijst verzonden aan de SKB-leden.

1.4 Samenstelling consortium

Het consortium dat de definitiestudie heeft uitgevoerd bestaat uit de volgende leden:

- Dhr. Ir. Peter den Nijs van WARECO Ingenieurs te Amsterdam;
- Dhr. Dr. René Klaassen van SHR Houtresearch te Wageningen;
- Dhr. Ing. Albert Smits van Dumea-KBBL;
- Dhr. Ing. John Braam van Dumea-KBBL (penvoerder).

In een volgend stadium zal het consortium worden bijgestaan door:

- Dhr. Ing. Remco Nigten van de Gemeente Zaandam.

Bij de uitvoering zal het consortium worden begeleid door:

- Mevr. Ir. Elze-Lia Visser/dhr A. Peekel Programmamanagers Technologie van SKB (organisatie)
- Dhr. Ir. Michiel Pluim van de Gemeente Den Haag (inhoudelijk)

1.5 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 van dit rapport zal een beschrijving van de uitgevoerde werkzaamheden en activiteiten worden weergegeven. Hoofdstuk 3 zal ingaan op de resultaten van de uitgevoerde werkzaamheden, waarna in hoofdstuk 4 conclusies worden getrokken.

HOOFDSTUK 2

OPZET EN UITVOERING DEFINITIESTUDIE

2.1 Algemeen

Bodemverontreiniging kent een lange geschiedenis. De eerste vormen dateren al uit de Bronstijd en ontwikkelingen als de verstedelijking en de industrialisatie hebben ertoe geleid dat op talloze plaatsen de bodem verontreinigd is geraakt. De bodem werd lange tijd gezien als een veilige plaats voor het opbergen van afval of het afbreken van verontreinigingen. Het verbeteren van de bodemkwaliteit middels bodemsaneringen ontstond in Nederland pas echt vanaf 1980, toen middels Lekkerkerk het beleid veranderde om de bodem zo snel mogelijk weer schoon te krijgen. Het beleid stelde dat verontreinigde bodem in Nederland onwenselijk is en vond dat de erfenissen van het verleden opgeruimd moeten worden. Op basis van de huidige cijfers zouden er jaarlijks ruim 2.000 locaties gesaneerd moeten worden (bron: NMP).

Bij de eerste bodemsaneringen werd gebruik gemaakt van geo-, civiel-, of cultuurtechnische technieken als grondverzet, grondwateronttrekking en het installeren van damwanden. Wanneer dit te duur werd, werd gekozen voor het isoleren, beheersen en controleren van de verontreinigde locatie door middel van schermwanden en grondwateronttrekkingen. Als alternatief voor de conventionele saneringstechnieken zijn de in situ technieken ontwikkeld. Met name in stedelijk gebied of daar waar bebouwing gehandhaafd wordt, worden deze technieken bij voorkeur toegepast. Bij in situ saneringstechnieken vindt nauwelijks grondverzet plaats, waardoor de functies van de bodem geacht worden in stand te blijven.

Paalfunderingen worden toegepast op slappe bodems welke in westelijk Nederland en in stroomgebieden van rivieren veel voorkomen. De dikte van de slappe laag varieert behoorlijk in Nederland van een 2-5 m in Den Haag tot 18 m in Rotterdam. Uit Amsterdam is het eerste gebruik van houten paalfunderingen bekend vanaf circa 1300. Wanneer paalfunderingen goed worden aangelegd, een goede constructie wordt gebruikt en de juiste houtsoorten worden toegepast, zijn ze duurzaam in gebruik. Het ongeveer 350 jaar oude Paleis op de Dam, gefundeerd op 13.657 vurenhouten Poolse palen, is hiervan een goed voorbeeld. Het ongeveer even oude Scheepvaartmuseum ook en het bijzondere van dit laatste pand is dat hier al een type fundering is toegepast die tot ver in de 20ste eeuw gangbaar is geweest.

Tot de 2de WO was de houten heipaal een algemeen gebruik in Nederland en bij grootschalige stedelijke uitbreidingen, zoals die rond het begin van de 20ste eeuw hebben plaats gevonden, was de houten heipaal belangrijk. Na de 2de WO kwam de betonnen heipaal sterk op en op dit moment worden houten heipalen alleen nog gebruikt voor kleine bouwprojecten in binnensteden, kassenbouw, onderheiding riolering en het jaarlijks gebruik wordt geschat op 200.000 palen. Om onder het freatisch grondwater te blijven worden tegenwoordig houten palen toegepast die tot onder de grondwaterspiegel geheid worden en voorzien zijn van een oplanger, een betonnen opzetstuk.

In oude binnensteden zitten niet alleen houten heipalen in de grond maar ook houten archeologische resten die een waardevol archief vormen van ons cultureel erfgoed.

Indien er een bodemverontreiniging is ontstaan en/of er gesaneerd dient te worden nabij paalfunderingen kan er dus aantasting van houten palen plaatsvinden. De vraag is of de beïnvloeding van in situ technieken van dien aard is dat er een dusdanig verlies in structuur- en draagkracht optreedt dat gebouwen schade oplopen.

2.2 Opzet van het onderzoek

Als startpunt voor de definitiestudie zijn de actuele informatie over houtdegradatie in de grond en in situ bodemsaneringstechnieken bijeengebracht. Met gebruikmaking van de bij de consortiumleden beschikbare ervaring zijn, zowel vanuit de invalshoek van in situ sanering alsmede vanuit de processen van houtdegradatie, de meest cruciale aspecten van bodemsaneringstechnieken en hun effect op de snelheid van houtaantasting in kaart gebracht.

Op basis van de verzamelde informatie is een document opgesteld dat voor achtergrondinformatie diende bij de enquête.

In figuur 1 is de opzet van de definitiestudie schematisch beschreven.

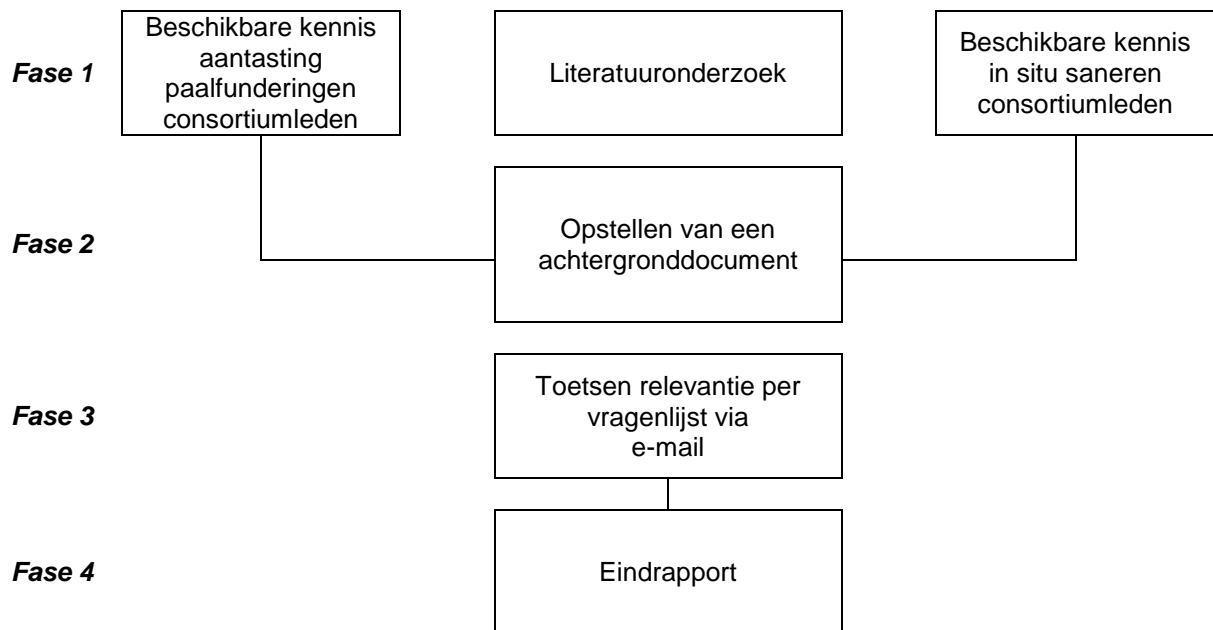


Fig. 1. Schematische weergave van de opzet van het onderzoek.

2.3 Fase 1: Literatuuronderzoek

Op basis van de inhoud van wetenschappelijke literatuur en andere documenten is een literatuuronderzoek uitgevoerd.

Gestart is met het bepalen van die informatiebronnen die in aanmerking komen om systematisch te doorzoeken, waarbij verwacht wordt dat er voor de vraagstelling relevante documenten of documentreferenties in staan. Bestaande overheidsrapporten (VROM) en de verslagen van het EU project "Bacpoles" en de recente wetenschappelijke literatuur met name de special over houtaantasting onder water van het tijdschrift international biodegradation biodeterioration 2008 (1) en proceedings van de ICOM WOAM bijeenkomst in Amsterdam oktober 2007 zijn leidend geweest. Tevens is getracht casussen te verzamelen vanuit de verschillende contactenkringen van de consortiumleden.

De resultaten van de literatuurstudie zijn gekoppeld aan de binnen het consortium beschikbare kennis van aantasting van houten paalfunderingen en van in situ saneringstechnieken.

2.4 Fase 2: Opstellen achtergronddocument

Op basis van de verzamelde informatie bij de literatuurstudie is een achtergronddocument opgesteld met voorlopige conclusies.

Door een relatie te leggen tussen de processen die de snelheid van houtafbraak versterken met de invloeden op de omgevingscondities door het gebruik van in situ saneringstechnieken is een overzicht opgesteld waaruit mogelijke risico's voor verlies in structuur- en draagkracht voor gebouwen kan worden afgeleid. Geconcludeerd wordt dat vervolgonderzoek naar de problematiek relevant wordt geacht.

2.5 Fase 3: Toetsen relevantie per vragenlijst via e-mail

Om meer inzicht te krijgen in de omvang van het probleem en om te onderzoeken of het probleem breed wordt erkend binnen de groep van potentiële eindgebruikers is een vragenlijst, voorzien van het opgestelde achtergronddocument, verzonden aan de SKB-leden.

De volgende vragen geformuleerd:

- 1 Zijn er bij u gevallen bekend waarbij saneringen niet zijn uitgevoerd vanwege risico's die betrekking hebben op funderingsschade?
- 2 Zijn er bij u gevallen bekend waarbij conventionele saneringen (graafwerk, oppompen van grondwater) zijn uitgevoerd in plaats van in situ saneringen, vanwege risico's die betrekking hebben op funderingsschade?
- 3 Het SKB is voornemens in het najaar een workshop over dit thema te organiseren. Wilt u aan deze workshop deelnemen?
- 4 Wilt u specifieke kennis inbrengen in dit onderzoekstraject?

De resultaten van dit onderzoek zijn in hoofdstuk 3 verwerkt.

2.6 Fase 4: Opstellen rapportage definitieve studie

In fase 4 is de voorliggende rapportage van de definitieve studie opgesteld.

HOOFDSTUK 3

RESULTATEN ENQUÊTE

3.1 Uitvoering

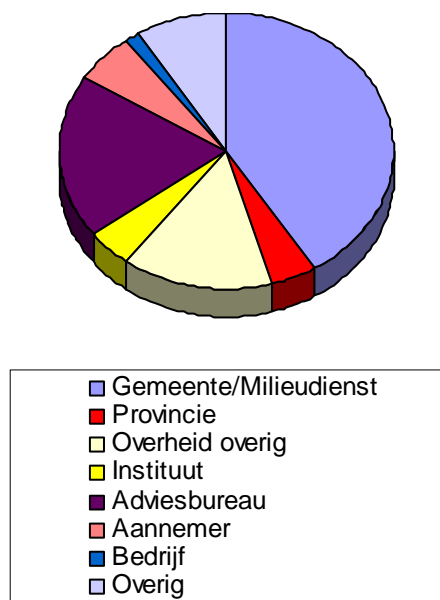
De door het consortium geformuleerde vragenlijst is door SKB middels een e-mail verzonden naar haar leden. Via de website van SKB konden de leden de vragen beantwoorden. De gegevens zijn door SKB verzameld in een spreadsheet. In totaal hebben 4.358 geadresseerden een vragenlijst ontvangen. Deze geadresseerden zijn verdeeld over circa 1.000 verschillende organisaties. Ongeveer 100 adressen zijn van personen en organisaties in het buitenland (met name België).

3.2 Resultaten

Middels diagrammen wordt het aantal respondenten vermeld en de antwoorden op de diverse vragen. Tevens is een indeling gemaakt van de soort organisaties die gereageerd hebben en is onderscheid gemaakt in de reacties per soort organisatie.

Tabel 1: Aantal reacties op enquête

Wie	Aantal	%
Gemeente/Milieudienst	28	41,2
Provincie	3	4,4
Overheid overig	10	14,7
Instituut	3	4,4
Adviesbureau	13	19,1
Aannemer	4	5,9
Bedrijf	1	1,5
Overig	6	8,8
Totaal	68	100



Figuur 2: Grafische weergave verdeling reacties enquête

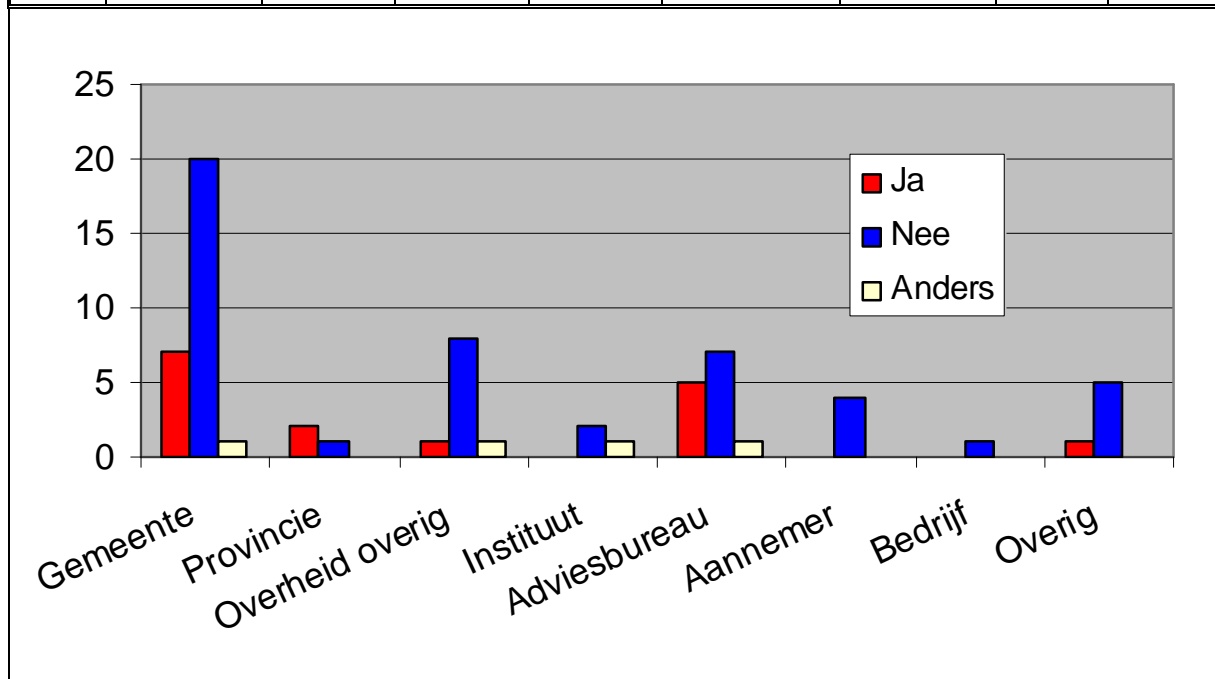
Vraag 1: Bekend met gevallen waarbij saneringen niet zijn uitgevoerd, vanwege risico's die betrekking hebben op funderingsschade:

Tabel 2: Reacties vraag 1

	Aantal	%
Ja	16	23,5
Nee	48	70,6
Anders	4	5,9

Tabel 3: Verdeling reacties vraag 1

	Gemeente	Provincie	Overheid overig	Instituut	Adviesbureau	Aannemer	Bedrijf	Overig
Ja	7	2	1	0	5	0	0	1
Nee	20	1	8	2	7	4	1	5
Anders	1	0	1	1	1	0	0	0



Figuur 3: Grafische weergave verdeling reacties vraag 1

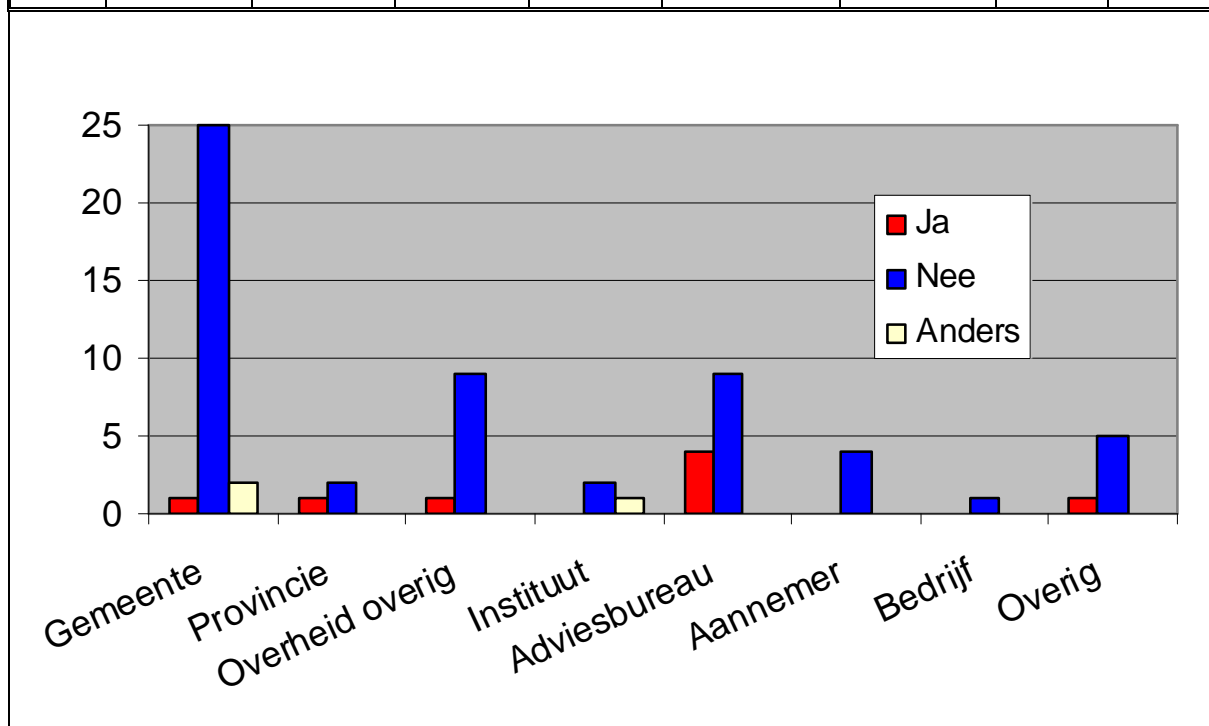
Vraag 2: Bekend met gevallen waarbij conventionele saneringen (graafwerk, oppompen van grondwater) zijn uitgevoerd in plaats van in situ saneringen, vanwege risico's die betrekking hebben op funderingsschade:

Tabel 4: Reacties vraag 2

	Aantal	%
Ja	8	11,8
Nee	57	83,8
Anders	3	4,4

Tabel 5: Verdeling reacties vraag 2

	Gemeente	Provincie	Overheid overig	Instituut	Adviesbureau	Aannemer	Bedrijf	Overig
Ja	1	1	1	0	4	0	0	1
Nee	25	2	9	2	9	4	1	5
Anders	2	0	0	1	0	0	0	0



Figuur 4: Grafische weergave verdeling reacties vraag 2

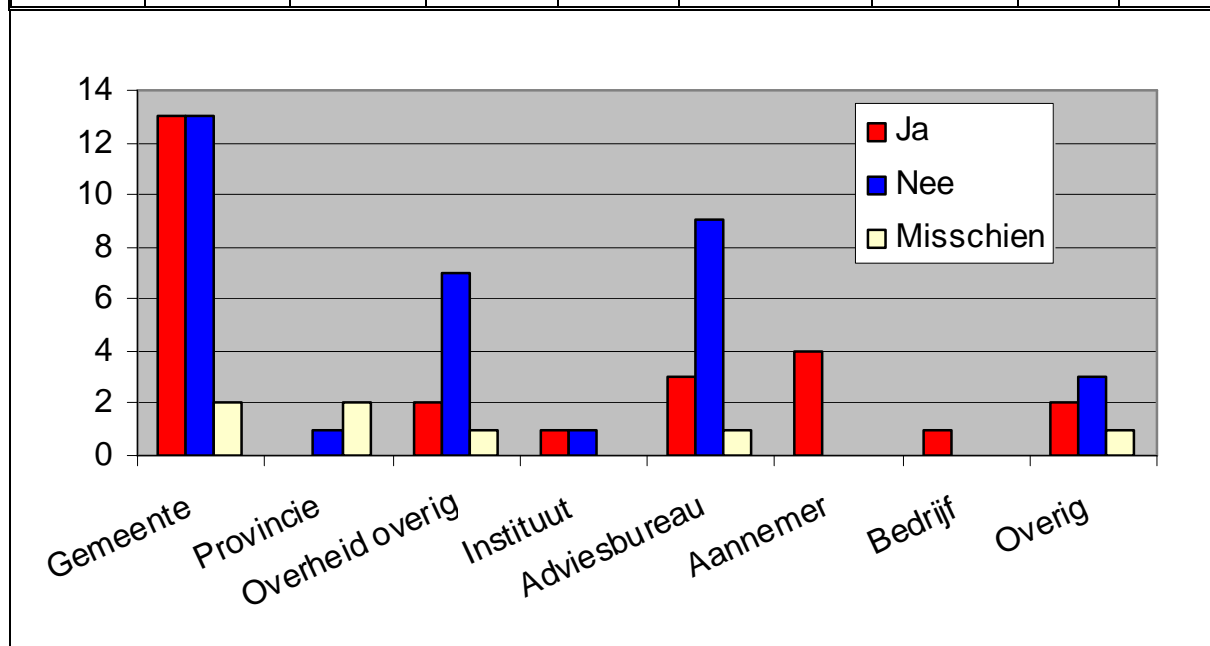
Vraag 3: Wens tot deelname aan Workshop.

Tabel 6: Reacties vraag 3

	Aantal	%
Ja	26	38,2
Nee	34	50,0
Misschien	7	10,3
Anders	1	1,5

Tabel 7: Verdeling reacties vraag 3

	Gemeente	Provincie	Overheid overig	Instituut	Adviesbureau	Aannemer	Bedrijf	Overig
Ja	13	0	2	1	3	4	1	2
Nee	13	1	7	1	9	0	0	3
Misschien	2	2	1	0	1	0	0	1
Anders	0	0	0	1	0	0	0	0



Figuur 5: Grafische weergave verdeling reacties vraag 3

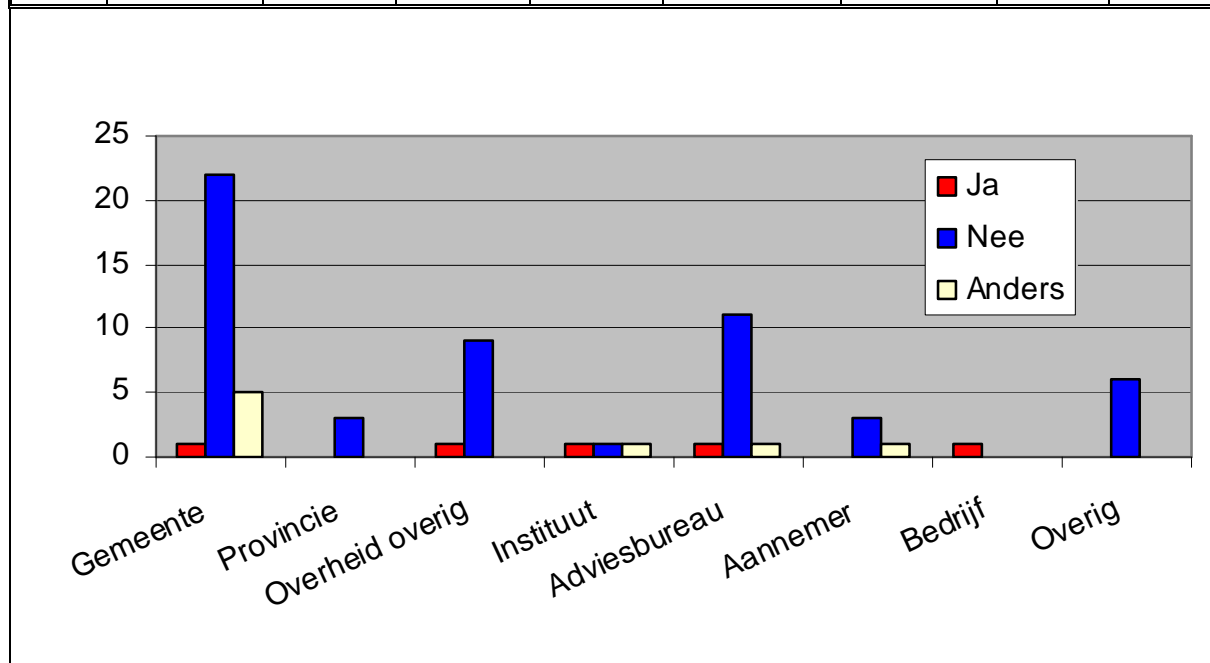
Vraag 4: Wens tot inbrengen specifieke kennis.

Tabel 8: Reacties vraag 4

	Aantal	%
Ja	5	7,4
Nee	55	80,9
Anders	8	11,8

Tabel 9: Verdeling reacties vraag 4

	Gemeente	Provincie	Overheid overig	Instituut	Adviesbureau	Aannemer	Bedrijf	Overig
Ja	1	0	1	1	1	0	1	0
Nee	22	3	9	1	11	3	0	6
Anders	5	0	0	1	1	1	0	0



Figuur 6: Grafische weergave verdeling reacties vraag 4

3.3 Bespreking resultaten enquête

De reacties op de enquête komen uit diverse type organisaties. Tweederde deel van de reacties is afkomstig van organisaties die te maken hebben met ontwerp en toetsing van bodemsaneringen (Gemeenten, Provinciën en Milieuadviesbureaus). Deze groepen zijn vooral belangrijk omdat deze organisaties betrokken zijn bij het ontwerp van bodemsaneringen en dus direct te maken hebben met de relatie bodemsanering en aantasting van houten paalfunderingen.

Bijna een kwart van de respondenten zijn bekend met gevallen waarbij saneringen niet zijn uitgevoerd vanwege de risico's die betrekking hebben op funderingsschade. Ruim 10 % van de respondenten is bekend met gevallen waarbij conventionele technieken zijn gekozen in plaats van in situ saneringstechnieken vanwege de risico's die betrekking hebben op funderingsschade.

De respondenten die "Nee" hebben ingevuld op de vraag of zij bekend zijn met gevallen waarbij saneringen niet zijn uitgevoerd vanwege risico's die betrekking hebben op funderingsschade, kunnen dit gedaan hebben omdat ze daadwerkelijk geen situaties zijn tegengekomen waarbij funderingsschade zou kunnen ontstaan. Het is echter ook mogelijk dat een "Nee" gekozen is omdat de risico's niet hoog worden ingeschat vanwege een kennisleemte.

Duidelijk is dat de organisaties die te maken hebben met ontwerp en toetsing van bodemsaneringen meer bekend zijn met gevallen waarbij een sanering niet is uitgevoerd vanwege de risico's op funderingsschade en gevallen waarbij een conventionele sanering is uitgevoerd in plaats van een in situ sanering, vanwege de risico's op funderingsschade. De respondenten komen uit het gehele land. Het is goed mogelijk dat de percentages hoger zijn in de gebieden met een hoge grondwaterstand en waarbij gefundeerd is op houten heipalen.

Voor nadere informatie over het onderwerp Bodemsanering in relatie tot Paalrot is veel belangstelling. Ruim 38% van de respondenten wil graag aan een Workshop deelnemen. Bijna 7,5% van de respondenten (5 stuks) heeft ook kennis die hij of zij graag wil inbrengen.

HOOFDSTUK 4

CONCLUSIES

Het gebrek aan kennis over de relatie tussen aantasting van houten heipalen en in situ bodemsanering wordt door meerderen direct betrokkenen herkend en er bestaat behoefte aan meer inzicht en overdracht.

Bijna een kwart van de respondenten is bekend met gevallen waarbij saneringen niet zijn uitgevoerd vanwege de risico's die betrekking hebben op funderingsschade.

Ruim 10% van de respondenten is bekend met gevallen waarbij conventionele technieken zijn gekozen in plaats van in situ saneringstechnieken vanwege de risico's die betrekking hebben op funderingsschade.

Veel bedrijven (bijna 40% van de respondenten) hebben behoefte aan nadere informatie over het onderwerp.

HOOFDSTUK 5

AANBEVELINGEN

Het effect van bodemsaneringstechnieken op heipaaldegradatie wordt gezien als een onderdeel van de grotere problematiek rond houten funderingen.

Het proces van bacteriële aantasting (houtaantasting onder water) is nog niet geheel in kaart gebracht waardoor de volgende kennisleemtes die van belang zijn voor bodemsanering nog niet beantwoord kunnen worden:

1. de maximale snelheid van bacteriële houtaantasting wordt nu geschat op ruim 1 mm/jaar. Dit betekent dat de diameter van een heipaal jaarlijks met 1 mm afneemt. Echter onder optimale omstandigheden zou deze snelheid groter kunnen zijn en mogelijk de snelheid van schimmelaantasting kunnen benaderen die tot een factor 100 hoger kan liggen;
2. het lijkt erop dat verschil in snelheid van bacteriële houtaantasting locatie gerelateerd is, een goede inventarisatie zou dit moeten aan tonen;
3. we hebben verschillende parameters in verband gebracht met het optreden en met de snelheid van bacteriële houtaantasting, al deze parameters zijn te beïnvloeden door menselijk handelen (bodemmanipulatie). Onduidelijk is wat de directe effecten zijn van de combinatie van bodemmanipulaties die gebruikt worden bij sanering en tot welke mogelijke extreme versnelling van de aantastingssnelheid dit kan leiden. Aanbevolen wordt laboratoriumproeven in te zetten om de relatie tussen aantasting en sanering daadwerkelijk te kunnen vaststellen;
4. indien het proces van bacteriële houtaantasting beter bekend zou zijn dan zouden tijdens bodemsaneringswerkzaamheden specifieke (mogelijk eenvoudige) maatregelen genomen kunnen worden die de houten heipalen beschermen in het veranderende bodemmilieu;
5. Het is zeer waarschijnlijk dat een manipulatie van de bodem een lange termijneffect heeft op de snelheid van aantasting in de houten heipaal. Niet direct na de sanering maar 15 – 25 jaar later zouden palen kunnen bezwijken. Daarom ook is meer kennis over het proces van houtaantasting onder water gewenst.

Om een goed antwoord te kunnen geven op de centrale vragen, zoals deze zijn geformuleerd in de inleiding, wordt een aanvullende fase middels een workshop in het kader van de onderhavige problematiek aanbevolen.

Op basis van de verzamelde reacties op de enquête onder SKB-leden bestaat een groot animo voor een dergelijke workshop. De helft van de respondenten geeft aan belangstelling te hebben een dergelijke workshop bij te willen wonen. Tevens hebben een vijftal organisaties aangegeven kennis te hebben over het onderwerp, die zij graag willen inbrengen.

BIJLAGE A

Samenvatting: effect van bodemsanering op aantasting van houten heipalen

Inleiding

Bodemverontreiniging kent een lange geschiedenis. De eerste vormen dateren al uit de Bronstijd, en ontwikkelingen als de verstedelijking en de industrialisatie hebben ertoe geleid dat op talloze plaatsen de bodem verontreinigd is geraakt. De bodem werd lange tijd gezien als een veilige plaats voor het opbergen van afval of het afbreken van verontreinigingen. Het verbeteren van de bodemkwaliteit middels bodemsaneringen ontstond in Nederland pas echt vanaf 1980, toen als gevolg van Lekkerkerk het beleid veranderde om de bodem zo snel mogelijk weer schoon te krijgen. Het beleid stelde dat verontreinigde bodem in Nederland onwenselijk is en vond dat deze erfenissen van het verleden opgeruimd dienden te worden.

Bij de eerste bodemsaneringen werd gebruik gemaakt van geo-, civiel-, of cultuurtechnische technieken als grondverzet, grondwateronttrekking en het installeren van damwanden. Wanneer dit te duur werd, werd gekozen voor het isoleren, beheersen en controleren van de verontreinigde locatie door middel van schermwanden, afdeklagen en grondwateronttrekkingen. Als alternatief voor de conventionele saneringstechnieken zijn in de loop der jaren in situ technieken ontwikkeld. Schoonmaken van grond en grondwater zonder grootschalige ontgraving. Met name in stedelijk gebied of daar waar bebouwing gehandhaafd wordt, worden deze technieken bij voorkeur toegepast. Bij in situ saneringstechnieken vindt nauwelijks grondverzet plaats, waardoor de functies van de bodem geacht worden in stand te blijven.

In grote delen van Nederland is stedelijke ontwikkeling vanaf circa 1300 samengegaan met het gebruik van houten palen voor het funderen van bouwwerken. Wanneer paalfunderingen goed worden aangelegd en de juiste houtsoorten worden toegepast, zijn ze duurzaam in gebruik. Het ongeveer 350 jaar oude Paleis op de Dam, gefundeerd op 13.657 vuren houten Poolse palen, is hiervan een goed voorbeeld. Paalfunderingen worden toegepast op plaatsen met een slappe bodem. Deze omstandigheden zijn in westelijke Nederland en in stroomgebieden van rivieren veel aanwezig. De dikte van de slappe laag kan behoorlijk variëren in Nederland van een 2-5 m in de binnenduinrand gebieden tot meer dan 20 meter in Rotterdam.

Tot de 2^{de} WO was de houten heipaal een algemeen gebruik in Nederland en bij grootschalige stedelijke uitbreidingen zoals die rond het begin van de 20^{ste} eeuw hebben plaatsgevonden, was de houten heipaal belangrijk. Vanaf de dertiger jaren werd ook veel de betonnen opzetter gebruikt. Hiermee werd op de houten paal een betonnen opzetter geplaatst en werd de samengestelde paal verder de grond in geslagen. Het houten deel van de paal bevond zich dan ver beneden het grondwaterpeil. Na de 2^{de} WO kwam de volledig betonnen heipaal sterk op en op dit moment worden houten heipalen alleen nog gebruikt voor kleine bouwprojecten in binnensteden, kassenbouw en onderheijng riolering. Jaarlijks worden nog circa 200.000 houten palen in de grond gebracht. Het hout dat in oude binnensteden in de grond zit, bestaat niet alleen uit een grote hoeveelheid houten palen maar ook uit archeologische resten die een waardevol archief vormen van ons cultureel erfgoed.

Hout in de bodem kan door uiteenlopende processen worden aangetast. Voor funderingshout kan dat betekenen dat de dragende functie daardoor verloren gaat en daarmee schade ontstaat aan het bouwwerk. Ingeval er een sanering van de bodem in de directe omgeving van de fundering moet worden uitgevoerd dient vooraf te worden bepaald of de houtkwaliteit niet extra in kwaliteit zal teruglopen als gevolg van de sanering. Specifiek is hier de vraag of de invloed van de in situ technieken van dien aard is dat er verlies in structuur- en draagkracht van de fundering optreedt.

Vanuit de invalshoek in situ sanering alsmede vanuit de processen van houtdegradatie bekeken, zijn de meest cruciale aspecten in kaart gebracht die het proces van houtaantasting door schimmels, bacteriën of zelfs abiotisch versnellen.

In bijlage B staan de processen die houtaantasting in de bodem beïnvloeden

In bijlage C staat een overzicht van de gevolgen in de bodem ten gevolge van saneringstechnieken

Relatie tussen de wijze van in situ bodemsaneren en het proces van houtaantasting

Door een relatie te leggen tussen de processen die de snelheid van houtafbraak versterken met de invloeden op de omgevingscondities door het gebruik van in situ saneringstechnieken is een overzicht opgesteld waaruit mogelijke risico's voor verlies in structuur- en draagkracht voor gebouwen kan worden afgeleid.

Tabel 1 geeft een overzicht van parameters aanwezig in saneringstechnieken die de snelheid van aantasting beïnvloeden.

Tabel 1 parameters die snelheid van houtaantasting beïnvloeden

volgnummer	parameter
1	Technieken die droogstand veroorzaken waardoor hout langdurig in aanraking komt met zuurstof uit de lucht. Naast het zuurstofaanbod beïnvloedt ook de snelheid van uitdrogen van het hout de snelheid van aantasting (pas als hout is uitgedroogd kan er lucht met zuurstof in, aantasting via de buitenzijde gaat langzaam);
2	Technieken die het grondwater oververzadigen met zuurstof (>25mg/l) en of zuurstof atomen in de grond brengen O ₃ , H ₂ O ₂ e.d. waardoor de productie van enzymen (houtaantastend) kan stijgen;
3	Technieken die continue en langjarig voor extra waterbeweging zorgen op verschillende hoogtes rond de paal (rond de kop, punt of er tussen), kleine bewegingen zijn reeds voldoende;
4	Technieken die er voor zorgen dat er langjarig een extra potentiaalverschil in waterdruk over de paal komt te staan. Kleine drukverschillen of wisselende drukverschillen zijn reeds voldoende;
5	Technieken die de zuurgraad van de bodem sterk doen veranderen. In het zure gebied is een pH < 3 ernstig. In het basische gebied treden al bij minder extreme waarden (abiotisch) houtafbraak plaats.

In tabel 2 worden de aspecten uit tabel 1 vertaald naar saneringstechnieken

Tabel 2: bodemsaneringstechnieken en hun positief effect op de snelheid van houtaantasting

	Sanerings-duur	Droog-stand	Over-verzadiging zuurstof	Langjarige water-beweging	Langjarig potentiaal-verschil in waterdruk	pH<3 of pH>9
1.5.1.1 Biologische technieken						
reductieve afbraak CKW	meerdere jaren	-	-	+/-	-	-
anaërobe afbraak aromaten		-	-	+/-	+/-	-
gestimuleerde aërobe afbraak		-	-	+	+	-
1.5.1.2 Chemische technieken						
chemische oxidatie	weken tot maanden	-	+	-	+/-	-
chemische reductie		-	-	-	-	+
metaalprecipitatie		-	-	-	-	-

1.5.1.1.3 Fysische technieken

grondwateronttrekking	maanden tot jaren	+	-	+	-	-
meerfase extractie		+	-	+/-	+/-	-
persluchtinjectie		-	-	+	+	-
bodemluchtonttrekking		-	-	-	+	-
bodemverwarming		-	-	+	+	-
surfactant/cosolvent flushing		-	-	+	+	-
elektroreclamatie		-	-	+	+	-

Tabel 2 laat zien dat elke saneringstechniek een positief effect heeft op de snelheid van aantasting van hout in de bodem. Om te kunnen beoordelen of een techniek zonder risico voor een houten paalfundering kan worden ingezet moet het effect gekwantificeerd worden en het is duidelijk dat de snelheid van het type aantasting hierbij een rol speelt alsmede de duur van de sanering. Bij een reeds verzwakte fundering kan verhoogde bacteriële activiteit binnen enkele jaren tot problemen leiden met betrekking tot de draagkracht van de palen. Verhoogde schimmelactiviteit kan binnen een jaar tot problemen leiden. De snelheid van abiotische aantasting door chemicaliën is moeilijk in te schatten in een grondsituatie maar het is bekend dat onder laboratoriumomstandigheden hoge snelheden kunnen worden bereikt.

Naast informatie over verontreiniging, bodemopbouw en saneringstechniek, is het dus belangrijk om bij het ontwerp van een in situ saneringstechniek de actuele actieve aantasting in de houten palen in kaart te brengen alsmede de mogelijke potentiële aantasting in relatie tot de duur van de sanering.

De laatste landelijke verkenning naar de omvang van problemen rondom houten heipalen dateert van 1997. Sindsdien heeft het Rijk (VROM) geen veldonderzoek meer verricht naar de omvang van deze problemen. Door het ontbreken van kennis over de huidige staat van de Nederlandse paalfunderingen en de natuurlijke aantastingsprocessen, zoals die hier plaatsvinden, kan geen reële risicoanalyse rond het toepassen van in situ methoden worden opgesteld. Veiligheidshalve wordt dan gekozen voor traditionele methoden van bodemsanering. Van deze traditionele methoden wordt gedacht dat de risico's wel zijn te bepalen. Het is zeker niet uit te sluiten dat juist in dichtbebouwd stedelijk gebied de risico's van traditioneel saneren veel groter (maar wel te bepalen) zijn dan in situ methoden. Gezien het bovenstaande dient het vervolg op deze definitiestudie minimaal te bestaan uit de volgende onderdelen:

- Landelijke inventarisatie op basis van alle inspecties die sinds 1997 zijn uitgevoerd op een standaard wijze (sinds 1997 is gewerkt met het protocol funderingsinspecties);
- Bepalen wat het katalytisch effect is van het toevoegen van elektronenacceptoren (bijv. zuurstof via beluchting) op de snelheid van aantasting in houten palen.

BIJLAGE B

Processen aantasting houten heipalen

Inleiding

Hout in de bodem wordt onder vrijwel alle omstandigheden aangetast door micro-organismen. Echter, de aard en snelheid van aantasting is afhankelijk van de structuur van het hout in relatie tot de bodem (zowel opbouw als hydrologie).

Hout is opgebouwd uit cellen die door onderlinge vorm en randschikking een anatomisch patroon vormen. Het celwandmateriaal van al deze elementen vormt de hoofdmoot van de houtmassa. De houtige celwand bestaat uit drie hoofdcomponenten: cellulose, hemicellulose en lignine. Hoewel de eerste twee componenten relatief eenvoudig zijn af te breken voor micro-organismen, zorgt de structuur van de matrix, waarin de drie componenten met elkaar verweven zijn, voor solide onderlinge samenhang waardoor enzymen van micro-organismen moeilijk kunnen infiltreren. Enzymen zorgen ervoor dat cellulose, hemicellulose en lignine in kleinere eenheden worden geknipt (depolymerisatie) welke zo klein zijn dat ze via de celwand in het micro-organisme als voedingsstof kunnen worden opgenomen. Voor de productie van de meest effectieve enzymen om de houtige celwand te depolymeriseren is veel zuurstof nodig, zoals bijvoorbeeld voor de productie van waterstofperoxide. Grote enzymen zijn weinig effectief omdat ze nauwelijks in staat zijn om de celwandmatrix te penetreren. Grote enzymen kunnen de celwand dus alleen via de buitenkant aantasten. Dit beperkt de snelheid van aantasting sterk. Er zijn ook micro-organismen die de celwand mechanisch penetreren door er in te groeien en in de celwand de enzymen af te geven waardoor er een grotere effectiviteit wordt bereikt. Echter, hiervoor is het noodzakelijk dat de aantaster voldoende celstructuur kan aanmaken en daarvoor zijn eiwitten nodig waarvan stikstof een essentiële component is. Typisch voor de houtige celwand is een hoog C/N verhouding wat betekent dat het arm aan stikstof is. Om een houtige celwand te kunnen afbreken moet een micro-organisme zich specialiseren om bij minimaal stikstofaanbod toch voldoende eigenweefsel te kunnen aanmaken. Sommige micro-organismen hebben dit probleem opgelost door in symbiose met stikstofbindende bacteriën te leven, terwijl andere dit doen door het eigen celweefsel te recyclen.

Schimmels zijn in staat om effectieve enzymen te produceren en om mechanisch het hout te penetreren. Onder optimale omstandigheden (voldoende zuurstof-, stikstof- en wateraanbod) kunnen schimmels zeer effectief hout aantasten waarbij binnen één jaar een stuk stamhout in de grond met een diameter van bijvoorbeeld 25 cm volledig is weggerot. Houtsoorten waar schimmels moeilijk in kunnen groeien (gesloten celstructuur) en/of bij houtsoorten met voor schimmels giftige inhoudstoffen (in het kernhout), worden veel langzamer aangetast en in extreme gevallen kan het stamhout na meer dan 30 jaar nog onaantast zijn. Bij minder gunstige omstandigheden voor schimmels (droog hout, geen zuurstofaanbod) krijgen bacteriën de kans op hout af te breken. In tegenstelling tot schimmels zijn bacteriën niet in staat hout actief te koloniseren en hebben bovendien een veel tragere enzymproductie dan schimmels. De aantastingssnelheid van bacteriën is dan ook vele malen langzamer (een factor 50 – 100 x) dan die van schimmels. Omdat bacteriële aantasting afhankelijk is van de mate waarin bacteriën door waterbeweging in het hout worden verspreid, is de gevoeligheid van een houtsoort afhankelijk van haar openheid voor watertransport.

Bruin- en witrot

Deze vormen van schimmelaantasting vinden plaats bij een houtvochtgehalte tussen 25 en 80%. Onder deze range bevat het hout te weinig vocht voor schimmelmultiplicatie en boven deze range is er zoveel vocht in het hout dat er te weinig zuurstofaanbod is. Dit komt omdat de diffusie van zuurstof in de lucht vele malen groter is dan in water.

Deze schimmelsoorten houden van een gelijkmatig klimaat en kunnen niet groeien bij sterke vocht- en temperatuurwisselingen. Hout dat sterk geëxposeerd is aan weersinvloeden wordt derhalve nauwelijks aangetast, echter in houtverbindingen waar vocht zich kan ophopen en waar de weersinvloeden getemperd zijn, kan wel schimmelaantasting ontstaan en hier komen dan houtaantastende schimmelsoorten voor, die gespecialiseerd zijn om te kunnen groeien bij enigszins wisselende klimaatomstandigheden.

In Nederland komen meer dan 300 schimmelsoorten voor, die hout kunnen afbreken en de sporen van deze houtaantastende schimmels komen altijd en overal voor. Als de omstandigheden gunstig zijn

voor schimmelgroei ontkiemen de altijd aanwezige sporen. De schimmelactiviteit kan leiden tot twee typen van aantasting in het hout namelijk bruin- en witrot.

Bruinrot komt met name in naaldhout voor en hierbij richten de schimmels zich met name op de (hemi)cellulose in het hout. Aangetaast hout is bros en bruin. *Gloeophyllum* (plaatjeshoutzwam) is een houtaantastende schimmel en omdat deze schimmel wisselende klimaatomstandigheden goed kan verdragen wordt hij vaak in naaldhouten kozijnen gevonden. De enzymmoleculen van bruinrotschimmels zijn niet al te groot waardoor de enzymen vanuit de schimmeldraad die in het hout is gegroeid, een relatief groot celwandgebied kunnen bereiken.

Witrot komt met name voor in loofhout en hierbij richten de schimmels zich op de lignine, vaak in combinatie met de (hemi)cellulose in het hout. Het hout wordt wit, zacht en vezelig. *Trametes versicolor* (elfenbankje) is een bekende witrotsort. Omdat witrot alle drie de celwandcomponenten (lignine, hemicellulose en cellulose) kan afbreken is het een agressieve aantaster. Witrot-enzymen zijn grote moleculen (zoals fenol-oxidase) die zich weinig kunnen verspreiden in de celwand en alleen rondom de schimmeldraad actief zijn. Om hout toch voldoende te kunnen aantasten groeien dunne schimmeldraden in de celwand, Ze drukken zich zelf als het ware in de poriën van de celwand en kunnen ter plaatse voor verdere aantasting zorgen.

Bij toenemende aantasting, zowel bij wit- als bruinrot neemt het schimmeldraadmateriaal af wat veroorzaakt wordt door het recyclen van de stikstof uit het celwandmateriaal.

Bruin- en witrot kunnen vanwege hun zuurstofrijke enzymen alleen hout aantasten bij een hoog zuurstofaanbod, dus zuurstof die via de lucht wordt aangevoerd. In de houtstructuur moet derhalve voldoende lucht aanwezig zijn. Bij een vochtgehalte boven de 80% zijn zoveel celholten met water gevuld dat er te weinig luchtdiffusie van zuurstof meer mogelijk is en wit- en bruinrotaantasting stopt. Schimmels hebben voor hun metabolisme water nodig en wanneer het houtvochtgehalte van het hout lager is dan 25% stopt schimmelgroei door watertekort.

Bij heipalen komt wit- en bruinrot niet voor tenzij de aantasting al in het hout aanwezig was vóór plaatsing of bij langdurige en zeer grote grondwaterstandverlagingen waarbij de paalkop uitdroogt tot een vochtgehalte van minder dan 80%.

Softrot

Deze vorm van schimmelaantasting komt voor in waterverzadigd hout (vochtgehalte > 80%) in aanwezigheid van zuurstof. Softrotschimmels hebben ten opzichte van bruin- en witrotschimmels een extra specialisme namelijk dat ze bij een laag zuurstofaanbod hout nog kunnen aantasten. Wanneer waterverzadigd hout is omgeven door lucht dan is de diffusie van zuurstof uit de lucht naar de buitenste laag hout voldoende voor softrotschimmelgroei. Deze omstandigheden komen voor rondom heipaalkoppen bij te lage grondwaterstanden. Bij ingeklonken bodems waar de paalkop in het water staat of bij paalkoppen in open (zandige) bodems leiden te lage grondwaterstanden al snel tot softrotactiviteit terwijl in dichtere bodems heipaalkoppen beter beschermd zijn tegen zuurstoftoevoer. Onder water zijn softrotschimmels alleen actief wanneer het water oververzadigd is met zuurstof. In zuurstofverzadigd water zit circa 12 mg/l en softrot schimmels zijn actief bij circa 25 mg/l. Deze situaties (25 mg/l) komen voor bij meerpalen op plekken met veel waterturbulentie (bijvoorbeeld ten gevolge van schroefbewegingen van schepen) of bij watercascades met een houten ondergrond (koeltorens). Neemt het zuurstofgehalte af dan daalt ook de schimmelactiviteit.

Softrot komt zowel in loofhout als in naaldhout voor en richt zich net als bruinrot met name op (hemi)cellulose. Door haar chemische samenstelling heeft naaldhout een grotere weerstand tegen softrotaantasting dan loofhout. Het aangetaaste natte hout wordt slijmerig maar in droge toestand ziet het er bruin en bros uit. Dit patroon van aantasting kan veroorzaakt worden door zo'n 300 schimmelsoorten.

Typisch voor softrotschimmels is dat ze altijd in de celwand groeien waardoor een karakteristiek anatomisch patroon ontstaat waardoor aantasting door droogstand ook na jaren nog te herkennen is. Het is noodzakelijk om in de celwand te groeien omdat de enzymen van softrotschimmels minder effectief zijn dan die van wit- en bruinrot. Echter, onder optimale omstandigheden hoeft de aantastingsnelheid van softrotschimmels niet onder te doen voor wit- en bruinrotschimmels.

Heipalen worden alleen aan de kop aangetaast, daar waar het grondwater niveau fluctueert. Hoewel een heipaalkop bij droogstand waterverzadigd kan blijven door wateraanvoer vanuit dieper gelegen hout, leidt droogstand toch tot softrotactiviteit. Indien de gronddekking rondom de paalkop is verdwenen (door inklinken bodem) leidt droogstand meteen tot schimmelactiviteit. Terwijl in een situatie waarbij de paalkop geheel is omgeven door bodemmateriaal, de schimmelactiviteit veel langzamer op gang komt. In dit laatste geval is de bodemsoort nog van belang. In zandige bodems gaat de aantasting dan sneller dan in klei- en veenbodem. Hoewel softrotschimmels onder water niet actief zijn, kunnen ze onder water wel lange tijd overleven en als een heipaalkop sterk gekoloniseerd is

door softrotschimmels wordt de aantasting bij een nieuwe periode van droogstand in het gehele gekoloniseerde gebied meteen actief. In dit verband wordt gezegd dat verschillende perioden van droogstand cumulatief tot aantasting leiden.

Bacteriële aantasting

Uit onderzoek blijkt dat houtaantastende bacteriën overal en altijd voorkomen in waterige milieus (Klaassen 2005). De omstandigheden rondom en in het hout bepalen of en hoe actief ze zijn. Om meer informatie over de aantasters te verkrijgen is het van belang om ze te isoleren en te identificeren. Er is veel ervaring met het isoleren van houtaantastende schimmels bij de houtonderzoeksinstituten, echter al de hierbij bekende procedures zijn niet toereikend voor het isoleren van houtaantastende bacteriën. In de jaren negentig zijn er studies geweest die *Pseudomonas* en *Enterobacter* in verband brachten met houtaantasting (bijvoorbeeld Stuurman & De Jong 1995). Wetenschappelijke studies hebben aangetoond dat dit niet correct is. De afgelopen jaren is er binnen een internationale onderzoeksgroep gewerkt aan technieken om houtaantastende bacteriën te isoleren (Björdal & Nilsson 2005 + 2008a en b, Nilsson et al. 2008) en te identificeren (Landy et al 2008). Net als bij schimmels die hout aantasten blijken er bij bacteriën ook verschijningsvormen van houtaantasting te zijn. Bij heipalen wordt met name het type gevonden dat wordt veroorzaakt door erosiebacteriën.

Het blijkt dat in de bodem voorkomende erosiebacteriën alleen als consortium, hout kunnen aantasten. Dit consortium bestaat uit zeer gespecialiseerde bacteriën waarschijnlijk uit het CFB (*Cytophaga-Flavobacterium-Bacteroides*) complex. Het specialisme zit hem in de samenwerking binnen het consortium. Het totale proces van houtaantasting wordt uitgevoerd door een keten van bacteriesoorten waarin de schakels afhankelijk van elkaar zijn. Ontbreekt één schakel of kunnen de schakels elkaar niet bereiken dan stopt de aantasting. Omdat de werkzaamheid van de bacterie-enzymen zeer lokaal is, is een direct contact tussen de bacterie en de celwand nodig. Dit wordt verwezenlijkt door het verkleven van de slijm laag van de bacterie aan de celwand. Omdat de bacterie geen voortbewegingsapparaat heeft kan de bacterie zich alleen verplaatsen door waterstroming of beweging van de slijm laag.

Omdat het consortium van houtaantastende bacteriën altijd in de grond aanwezig is, begint direct na het slaan van palen in de grond, de aantasting. Deze aantasting begint aan de buitenzijde van de paal en verplaatst zich met toenemende aantasting verder naar binnen toe. Uit de SHR database van circa 3000 paalkoppen blijkt, dat op sommige plaatsen de aantasting in 100 jaar slechts 1 mm diep in de paal zit terwijl op andere plaatsen de aantasting in dezelfde periode wel tot 100 mm in het hout kan dringen. De hoogste gemeten snelheid van bacteriële aantasting in grenen- en vurenspint is voor beide houtsoorten ongeveer 2 mm / jaar. Voor het kernhout van grenen ligt deze snelheid meer dan een factor 20 lager. Voor vurenkern hebben we nog geen inschatting kunnen maken maar zeker is dat dit ruim hoger ligt dan bij grenen kernhout (Klaassen 2007).

De snelheid van de bacteriële aantasting van houten funderingspalen kan sterk variëren tussen gebieden. Zo wordt in de ene Nederlandse gemeente een veel hogere gemiddelde aantastingsnelheid waargenomen dan in een andere gemeente (Klaassen 2008a). Verder kunnen er ook lokaal grote verschillen bestaan. Op basis van een databestand van 1400 heipaalkoppen is een overzicht gemaakt voor de Amsterdamse situatie voor zowel de grenen als voor de vuren palen. Uit deze analyse blijkt dat binnen de Amsterdamse situatie de snelheid van bacteriële aantasting sterk varieert (Klaassen 2007).

Nu zijn er sterke aanwijzingen dat de gevonden verschillen in aantastingsnelheid samenhangen met waterbeweging in de heipaal. Omdat waterbeweging niet in alle houtsoorten en houttypen even gemakkelijk is, zou de gevoeligheid voor bacteriële aantasting houtsoortafhankelijk kunnen zijn en dit blijkt met praktijkobservaties te kloppen. Hout met een open structuur zoals els, populier en het spint van grenen en eiken zijn gevoelig, terwijl hout met een meer gesloten structuur zoals vuren, eikenkern, douglas en lariks minder gevoelig zijn. Dat een verschil in grondwaterpotentiaal over de paal een waterbeweging in het hout kan doen ontstaan, is experimenteel aangetoond (Klaassen 2008b). Het gaat hierbij uitsluitend om axiale waterbewegingen en niet om radiale bewegingen. Grondwater zou dus een sturende functie kunnen hebben op het proces van bacteriële aantasting.

Het lijkt erop dat al het hout over de gehele lengte wordt aangetast en dat de paalpunt een vergelijkbare mate van aantasting kan hebben als de hoger gelegen paalkop. Dit aspect is nog onvoldoende uitgewerkt en lopend onderzoek zal in de komende tijd hierover meer duidelijkheid geven, want op dit moment is er slechts informatie van een beperkt aantal palen die over de gehele

lengte op aantasting zijn onderzocht. Alle onderzochte palen zijn over de gehele lengte aangetast en hoewel bij de meeste palen de mate van aantasting in de punt vergelijkbaar is met de aantasting in de kop waren er ook palen waarbij de aantasting naar de punt minder was dan aan de kop. Vanuit het archeologische onderzoek komen gegevens beschikbaar die erop duiden dat grondwaterdynamiek ook een plaatselijk effect heeft. Bijvoorbeeld in situaties waar het grondwaterniveau rondom een stuk hout varieert (aërobe zone) wordt geen schimmelactiviteit gevonden maar wel en alleen ter plaatse van de aërobe zone een sterkere mate van bacteriële aantasting. Vanuit de archeologie zijn ook andere observaties beschikbaar waarbij in moerassen en een omgeving zonder zuurstof en zonder waterdynamiek hout duizenden jaren geconserveerd kan blijven. Er zijn grenen palen gevonden in Zeeland van 6000 jaar oud (Klaassen 2005). Steekt het hout echter boven het moeras uit of raakt het een goed waterdoorlatende zandlaag, dan worden houtaantastende bacteriën actief. Ook bij de opgraving van de Romeinse schepen in Leidsche Rijn zijn deze processen waargenomen maar dan in een veen – klei – zandige omgeving. Hier bleek dat hout in een slecht doorlatende bodemlaag sterker was aangetast dan hout in een zandlaag en ook hier wordt gesuggereerd dat waterdynamiek in het hout hiervoor verantwoordelijk was. Als hout een verbinding is door een slecht doorlatende bodemlaag dan is de eenvoudigste weg van het water door het hout omdat in de weerstand die water ondervindt om door een zandlaag te gaan lager is dan de weerstand om door hout gaan (De Groot & Morel 2007, Huisman & Klaassen 2005).

Tenslotte zijn er observaties aan damwanden en andere schermen (bijvoorbeeld bij gemalen) die laten zien dat daar waar waterstroming langs of door het hout mogelijk is, hout snel door bacteriën wordt aangetast. Bij damwanden blijkt dat aantasting met name voorkomt bij de sponning en de veer, dus op plaatsen waar de waterkerendheid van de constructie het kleinst is.

Aanvullende observaties

In het Vasa museum in Stockholm staat een eiken scheepswrak dat in de jaren 60 van de vorige eeuw is opgegraven uit de haven van Stockholm en dat geconserveerd is met PEG. Het schip is in de paar honderd jaar dat het in het water heeft gelegen door bacteriën aangetast en de PEG conservering zorgt ervoor dat in het museum opgesteld kan worden. De laatste jaren is er echter weer verdere degradatie van de houtstructuur waargenomen en het blijkt dat het hier niet om een biologische aantasting gaat maar om een chemische. Het vermoeden bestaat dat deze aantasting wordt veroorzaakt door een zwavel- en ijzerreactie mogelijk in combinatie met zuurstof. Het vermoeden bestaat dat er veel zwavel in het hout is opgehoopt door de langdurige bacteriële activiteit toen het schip nog onder water lag (Björdal et al. 2007).

In aangetaste heipalen wordt veelvuldig pyriet waargenomen in de houtstructuur. Dit betekent dat in het hout zwavel en ijzer vanuit andere locaties bij elkaar kunnen komen en reageren tot pyriet. Deze observaties geven aanleiding om een rol toe te kennen in het proces van bacteriële aantasting van of de zwavel of het ijzer. Verder geeft het voorkomen van pyriet aan dat water in hout beweegt en onderschrijft daarmee de hypothese dat grondwaterdynamiek direct van invloed is op de waterbeweging in het hout (Huisman et al 2007).

Vertaling naar saneringstechnieken

1. Technieken die droogstand veroorzaken.
2. Technieken die meer dan 25 mg/l zuurstof in het grondwater brengen.
3. Technieken die continue en langdurige (jaren) waterbeweging veroorzaken (hoeft maar heel klein te zijn).
4. Technieken die het potentiaalverschil in grondwaterdruk veranderen.
5. Technieken die 'gemodificeerde' zuurstofmoleculen in de grond brengen (kan een effect hebben op een verhoogde of gemakkelijkere enzymproductie).

Literatuur

- Anagnost, S.E. 1998. Light microscopic diagnosis of wood decay. *IAWA journal* 19 (2): 141-167.
- Björdal, C.G. 2000. Waterlogged archaeological wood. – biodegradation and its implications for conservation Doctoral thesis. *Acta universitatis agriculturae Sueciae, silvestria* 142.
- Björdal, C.G., T. Nilsson & G. Daniel. 1999. Microbial decay of waterlogged archaeological wood found in Sweden. *International Biodeterioration & Biodegradation* 43 63-71.
- Björdal, C.G., Nilsson, T., 2005. Isolation of bacteria, In: Klaassen, R., (Ed.) Final Report Eu-Project, Preserving cultural heritage by preventing bacterial decay of wood in foundation poles and archaeological sites, EVK4-CT-2001-00043, pp. 93-98.
- Björdal, C., Nilsson, T., 2008. Culturing wood-degrading erosion bacteria. *International Biodeterioration and Biodegradation* (61-1 @ @).
- Björdal, C., Nilsson, T., 2008. The use of kapok fibres for enrichment cultures of lignocellulose-degrading bacteria. *International Biodeterioration and Biodegradation* 61-1 @ @.
- Björdal, C.G., Nilsson, T., T. Iversen. 2007. Microbiological degradation and chemical characterisation of Vasa timber. Paper on the 10th ICOM-WOAM conference, Amsterdam September 2007.
- Blanchette, R.A. 1995. Biodeterioration of archaeological wood. *Biodeterioration Abstracts* 9 (2) 113-127
- Butterfield, B.G.; Meylan, B.A., 1980. Three-dimensional structure of wood. An ultrastructural approach. Chapman & Hall: London, New York, 2nd edn.: 103.
- Eaton, R.A. & M.D.C. Hale. 1993. Wood, decay, pests and protection. Chapman & Hall.
- Eriksson, K.E.; Blanchette, R.A. & P. Ander. 1990. Microbial and enzymatic degradation of wood and wood components. Springer-Verlag.
- Gent, van H. 1997. Houtrot in bomen. Uitgegeven door: Bomen-stichting, IPC groene ruimte, kring praktiserende boomverzorgers. Van den Berg's Drukkerij Maarn.
- Groot, de T., J.M.A.W. Morel. 2007. Het schip uit de Romeinse tijd De Meern 4 nabij boederij de Balijs, Leidsche Rijn, gemeente utrecht. RACM rapportage Archeologische monumentenzorg 147.
- Klaassen, R.K.W.M. (Ed.), 2005. Final report of EU project BACPOLES, Preserving cultural heritage by preventing bacterial decay of wood in foundation piles and archaeological sites EU number: EVK4-CT-2001-00043.
- Grosser, D. 1985. Pflanzliche und tierische Bau- und Werkholz Schädlinge. DRW-Verlag.
- Harmsen, L. & T. V. Nissen. 1965. Der bakterienangriff auf Holz. *Holz Roh- Werkstoff* 23: 389-393.
- Huisman, H., R.K.W.M. Klaassen 2005. Variation in wood degradation in three roman oak ships from the Neherlands. In P. hoffmann, S. Straetkvern, J.A. Spriggs, D. Gregory (eds.), *Proceedings of the 9th ICOM-WOAM conference, copenhagen 2004, Bremerhaven*, 145-169.
- Huisman, D.J., Kretschmar, E.I., Lamersdorf, N., 2008. Characterising physico chemical sediment conditions at selected bacterial decayed wooden pile foundation sites in The Netherlands, Germany and Italy. *International Biodeterioration and Biodegradation* (61-1 @).
- Kim, Y.S. & A.P. Singh. 2000. Micromorphological characteristics of wood biodegradation in wet environments: a review. *IAWA journal* 21 (2): 135-155
- Klaassen, R.K.W.M. 2005. BACPOLES final report EU project EVK4-CT-2001-00043: Preserving cultural heritage by preventing bacterial decay of wood in foundation piles and archaeological sites.
- Klaassen R.K.W.M., 2007. Velocity of bacterial decay in wooden foundation piles *Proceedings ICOM WOAM Amsterdam* (in press).
- Klaassen R.K.W.M., 2008a. Bacterial decay in wooden foundation piles: patterns and causes. A study on historical pile foundations in the Netherlands. *International Biodeterioration and Biodegradation* (61-1 @2).
- Klaassen R.K.W.M., 2008b. Water flow through wooden foundation piles – a preliminary study. *International Biodeterioration and Biodegradation* (61-1 @2).
- Kretschmar, E.I., Gelbrich, J., Militz, H., Lamersdorf, N., 2008a. Studying bacterial wood decay under low oxygen conditions – results of microcosm experiments. *International Biodeterioration and Biodegradation* (in press).

- Kretschmar, E.I., Keijer, H., Nelemans, P., Lamersdorf, N., 2008b. Investigating physico-chemical sediment conditions at decayed wooden pile foundation sites in Amsterdam. *International Biodeterioration and Biodegradation* (in press).
- Landy, E., Mitchell, J. Hotchkiss, S. & R. Eaton. 2008. Bacterial Diversity associated with Archaeological waterlogged Wood: Ribosomal RNA Clone Libraries and Denaturing Gradient Gel Electrophoresis (DGGE). *International Biodeterioration and Biodegradation* (in press).
- Nilsson, T. Björdal, C. & Fällman. 2008. Culturing erosion bacteria: Procedures for obtaining purer cultures and pure strains. *International Biodeterioration and Biodegradation* (in press).
- Nilsson, T., Singh, A.P., 1984. Cavitation bacteria. International Research Group for Wood Preservation No. 1235.
- Sass-Klaassen U., Vernimmen T. & C. Baittinger, 2008. Dendrochronological dating and provenancing of timber used as foundation piles under historic buildings in the Netherlands. *International Biodeterioration and Biodegradation* (in press).
- Stuurman, R.J. & J. de Jong. 1995. Grondwatersituatie Amsterdamse buurt Haarlem. TNO rapport GG-R-95-58(B).

BIJLAGE C

Overzicht gevolgen in de bodem ten gevolge van saneringstechnieken

In situ bodemsanering is grofweg onder te verdelen in een drietal verwijderingsprocessen, nl. biologisch, chemisch en fysisch. In tabel 1 zijn de meest voorkomende in situ saneringstechnieken per hoofdgroep samengevat.

Tabel 1: overzicht in situ saneringstechnieken per hoofdgroep

Biologische technieken	Chemische technieken	Fysische technieken
B1 Natuurlijke afbraak	C1 Chemische oxidatie	F1 Spoelen met grondwater
a) reductieve afbraak (CKW)	a) Fenton's reagens	F2 Meerfase extractie
b) oxidatieve afbraak (aromaten, olie)	b) permanganaat	F3 Persluchtinjectie
B2 Gestimuleerde anaërobe afbraak	c/d) ozon / perozon	F4 Bodemluchtonttrekking
a) reductieve afbraak (CKW)	C2 Chemische reductie	F5 Elektroreclamatie
b) anaërobe afbraak (aromaten)	C3 Vastlegging	F6 Cosolvent / surfactant flushing
B3 Gestimuleerde aërobe afbraak		F7 Bodemverwarming
		a) stoominjectie
		b) elektrisch verwarmen

[bron: SIKB,VKB-protocol 6002, versie 2.0, 10-05-2007]

Naast beïnvloeding door verontreinigingsparameters, heeft toepassing van elk van deze technieken zijn invloed op de omgevingscondities in de bodem. In het hiernavolgend overzicht wordt per actieve saneringstechniek ingegaan op de te verwachten effecten in de bodem.

Biologische technieken

B2 Gestimuleerde anaërobe afbraak	
a) reductieve afbraak CKW	
Gestimuleerde anaërobe restauratie van met CKW verontreinigde bodems is een saneringsbenadering die erop gericht is de bodemcondities gunstig te maken voor microbiële reductieve dechlorering. In dit dechloreringsproces worden chlooratomen vervangen door waterstofatomen, waarbij de CKW gebruikt wordt als electron-acceptor.	
<i>procesparameter</i>	<i>nagestreefd gevolg</i>
TOC/DOC/CZV	> achtergrondwaarde
zuurstof	< 1 mg/l
nitraat	< 1 mg/l
ijzer(II)	> achtergrondwaarde
sulfaat	< 10 mg/l
methaan	> 1 mg/l
pH	6-8 (dosering van koolstofbron kan verzuring tot gevolg hebben)

B2 Gestimuleerde anaërobe afbraak

b) anaërobe afbraak aromaten

Gestimuleerde anaërobe restauratie van met aromaten verontreinigde bodems is een saneringsbenadering die erop gericht is de bodemcondities gunstig te maken voor microbiële afbraak. Hierbij kunnen nitraat en sulfaat gebruikt worden als elektronenacceptor.

<i>procesparameter</i>	<i>nagestreefd gevolg</i>
e-acceptor: nitraat, sulfaat	> achtergrondwaarde
carbonaten/alkaliniteit	> achtergrondwaarde
zuurstof	0-10 mg/l
ijzer(II)	0-100 mg/l
methaan	0-35 mg/l
pH	5-8

B3 Gestimuleerde aërobe afbraak

Stimulering van de microbiële aërobe afbraak kan plaatsvinden door zuurstof als elektronenacceptor toe te voegen.

<i>procesparameter</i>	<i>nagestreefd gevolg</i>
zuurstof	0-10 mg/l
pH	5-8
Nutriënten (N, P)	C:N:P 250:5:3

Chemische technieken**C1 Chemische oxidatie**

a) Fenton's reagens

Bij in situ chemische oxidatie (ISCO) wordt een sterk oxidatiemiddel in de bodem gebracht. Wanneer het oxidatiemiddel in de bodem in contact komt met de verontreiniging wordt deze via chemische weg afgebroken (geoxideerd) tot water en koolstofdioxide.

Fenton's reagens bestaat uit een mengsel van een waterstofperoxideoplossing met ijzer. De volumeverhouding van de waterstofperoxideoplossing is meestal tussen 5 tot 10 %. Om de oplosbaarheid van ijzer te maximaliseren heeft Fenton's reagens een zuur milieu nodig. De optimale pH om deze ijzerconcentraties in het water te maximaliseren is tussen 3,5 en 5. Om de pH aan te passen wordt vaak een zuur zoals HCl of H₂SO₄ toegevoegd aan de bodem.

<i>procesparameter</i>	<i>nagestreefd gevolg</i>
temperatuur	< 45°C
pH	4-5
redoxpotentiaal	> achtergrondwaarde
zuurstof	> achtergrondwaarde
zwere metalen	< I-waarde

C1 Chemische oxidatie

b) Permanganaat

Permanganaat is een mild oxidatiemiddel. De afbraakreactie van permanganaat is zeer specifiek voor verontreinigingen die dubbele of driedubbele koolstofverbindingen bevatten. Daarnaast is de stabiliteit van het oxidatiemiddel in de bodem groot. Afhankelijk van de bodem en de verontreinigingssituatie kan permanganaat meerdere weken reactief zijn en de verontreiniging afbreken. De reactiesnelheid bedraagt 1 tot 3 dagen.

Er bestaan commercieel voornamelijk 2 types permanganaat: kaliumpermanganaat en natriumpermanganaat. Kaliumpermanganaat wordt als vast zout aangeleverd, terwijl natriumpermanganaat als een vloeistof met een massaverhouding van 40% wordt aangeleverd.

Bij chemische oxidatie met kaliumpermanganaat worden normaal oplossingen met een volume verhouding van 3 tot 5 % gebruikt, voor natriumpermanganaat oplossingen tot 25 %.

<i>procesparameter</i>	<i>nagestreefd gevolg</i>
permanganaat	> achtergrondwaarde
redoxpotentiaal	> 0 mVolt
zware metalen	< I-waarde

C1 Chemische oxidatie

c/d) Ozon/AOP

Ozon kan direct met een verontreiniging reageren of via de gevormde hydroxylradicalen. De oxidatie door radicalen is sneller dan de oxidatie door ozon zelf.

Het Advanced Oxidation Proces (AOP) is een variant van chemische oxidatie waarbij de oxidatie voor een groot deel verloopt via OH• radicalen. Deze radicalen zijn zeer reactieve verbindingen of atomen die maar zeer kort bestaan. Hierdoor reageert een OH• radicaal non-selectief en onmiddellijk. De radicalen worden geïnitieerd door de combinatie van ozon en waterstofperoxide.

<i>procesparameter</i>	<i>nagestreefd gevolg</i>
ozon	> achtergrondwaarde
zuurstof	> achtergrondwaarde
carbonaten/alkaliniteit	> achtergrondwaarde

C2 Chemische reductie

1) ijzerscherm

Een ijzerscherm bestaat uit nulwaardig ijzer of ijzerhoudende mineralen die de gechlloreerde koolwaterstoffen reduceren. De elektronen die vrijkomen bij de oxidatie van het ijzer worden gebruikt om de chloride atomen te verwijderen van de koolwaterstoffen.

<i>procesparameter</i>	<i>nagestreefd gevolg</i>
redoxpotentiaal	< -100 mVolt
pH	< 10 (ijzerscherm verhoogt pH)
electronacceptoren: nitraat, sulfaat	< achtergrondwaarde
geleidbaarheid	> achtergrondwaarde
carbonaten/alkaliniteit	> achtergrondwaarde

C3 Vastlegging zware metalen

1) in situ metaalprecipitatie 2) toeslagstof bouwvoor

ISMP is een in-situ bodemsaneringstechniek waarbij mobiele zware metalen in de bodem worden vastgelegd (of: geïmmobiliseerd) als metaalsulfide. De ISMP-techniek bestaat concreet uit injectie van één of meerdere hulpstoffen (bijvoorbeeld melasse) in de verontreinigde zone van het watervoerende pakket. Na injectie volgt een periode waarin (al of niet actieve) verspreiding van specifieke hulpstoffen in het grondwater plaatsvindt. De hulpstoffen stimuleren vervolgens de microbiologische sulfaatreductie in de bodem, waarbij sulfide wordt gevormd. Sulfaatreductie vindt plaats onder anaërobe (zuurstofloze) omstandigheden en in aanwezigheid van een geschikte koolstofbron en voldoende sulfaat. Het sulfaat wordt dan door de van nature voorkomende sulfaatreducerende bacteriën gereduceerd tot sulfide. Het sulfide bindt zich vervolgens vrij snel met de opgeloste mobiele zware metalen. De metaalsulfides hebben als eigenschap dat ze nagenoeg onoplosbaar zijn in water en 'verdwijnen' uit de waterfase door middel van precipitatie (neer slaan).

De metalen worden zo omgezet in een vaste vorm en kunnen zich niet meer verspreiden.

<i>procesparameter</i>	<i>nagestreefd gevolg</i>
redoxpotentiaal	< -100 mVolt
pH	> 4
sulfaat	> achtergrondwaarde
zuurstof	< 1 mg/l

Fysische technieken

F1 Spoelen met grondwater

Mobiele stoffen

De techniek Spoelen met grondwater (Pump-and-Treat) berust op het onttrekken (en infiltreren) van grondwater. In de bodem ontstaat een stroming van grondwater naar het onttrekkingspunt. Met het grondwater mee vindt transport van de verontreinigingen plaats. Wanneer de verontreiniging goed uitloogbaar is en de doorlatendheid van de bodem voldoende groot is, is vergaande verwijdering van verontreinigingen mogelijk.

<i>procesparameter</i>	<i>nagestreefd gevolg</i>
grondwaterstand	lager dan achtergrondwaarde
infiltratie van gezuiverd water	CO ₂ -ontgassing, toename O ₂

F2 Meerfase extractie

Bij drijfslagverwijdering door meefase(vacuüm)extractie (MFE of MPE) worden simultaan meerdere mobiele fasen waarin product aanwezig is onttrokken door het aanleggen van een vacuüm (onderdruk tot maximaal -1 bar) op een filter of een haalbuis. MFE is ook bekend onder de naam bioslurpen en VER (vacuum enhanced recovery). De verschillende fasen bestaan uit lucht, water, puur product en emulsies. De onttrokken drijfslag wordt bovengronds opgevangen in een tank of vat, waarna scheiding tussen water en puur product plaatsvindt, het water en de lucht separaat worden gezuiverd en het puur product wordt afgevoerd.

<i>procesparameter</i>	<i>nagestreefd gevolg</i>
grondwaterstand	lager dan achtergrondwaarde
verversing bodemlucht	toename O ₂ in onverzadigde zone

F3 Persluchinjectie + bodemluchtonttrekking

Persluchinjectie vergroot de beschikbaarheid van de verontreinigende stof in de waterfase. Vluchtige verbindingen worden in de (bodem)luchtfase gebracht, waar ze onttrokken worden middels een bodemluchtexttractiesysteem. Wanneer de verontreiniging goed stripbaar is en de doorlatendheid van de bodem voldoende groot is, is vergaande verwijdering van vluchtige verontreinigingen uit het grondwater mogelijk.

<i>procesparameter</i>	<i>nagestreefd gevolg</i>
zuurstof	0-10 mg/l
grondwaterstand	fluctuerend

F4 Bodemluchtonttrekking

Vluchtige stoffen

Bodemluchtonttrekking is gericht op verwijdering van vluchtige stoffen uit de onverzadigde zone. Door op een bepaald punt een onderdruk in de bodem aan te brengen begint bodemlucht, met daarin verontreiniging, naar dit punt te bewegen. De afgezogen lucht wordt vervolgens gereinigd.

<i>procesparameter</i>	<i>nagestreefd gevolg</i>
zuurstof	toename O ₂ in onverzadigde zone
grondwaterstand	afhankelijk van grondwaterstand fluctuerend

F5 Bodemverwarming

a) stoominjectie b) elektrisch verwarmen

Bij opwarming van de bodem treden een groot aantal processen op. Bij hogere temperaturen verlopen diffusieprocessen sneller.

De Henry's constante is een maat voor het evenwicht tussen concentraties van een stof in opgeloste fase en in dampfase en is mede afhankelijk van zowel de oplosbaarheid als de dampspanning. Bij hogere temperaturen verschuift dit evenwicht naar de dampfase.

De oplosbaarheid neemt toe bij hogere temperaturen.

Desorptie verloopt sneller bij hogere temperaturen. Door thermische conductie wordt warmte overgedragen aan de omgeving.

Warme dampen en vloeistoffen zijn lichter dan koude en hebben dus de neiging 'op te drijven'. Hierdoor worden dampen en/of vloeistoffen uit de omgeving aangetrokken.

<i>procesparameter</i>	<i>nagestreefd gevolg</i>
temperatuur	>70°C
hoogtemetingen	controle op zettingen

F6 Surfactant/cosolvent flushing

Slecht in (grond)water oplosbare, organische verontreinigingen kunnen worden gemobiliseerd door de oppervlaktespanning tussen de verontreiniging en de waterfase te verlagen via het toevoegen van oppervlakte-actieve stoffen. Deze stoffen zijn ook bekend onder de naam surfactants, naar een woordcombinatie van "surface active agents". Omdat olieproducten uit vele verschillende componenten bestaan worden bij surfactant-flushing ook veelal mengsels gebruikt waarbij ook surfactants met verschillende ketenlengtes of polariteiten worden toegepast. In deze mengsels worden ook vaak geringe hoeveelheden oplosmiddelen verwerkt. Wanneer deze de overhand de krijgen spreekt men van co-solvent-flushing.

<i>procesparameter</i>	<i>nagestreefd gevolg</i>
surfactant/cosolvent flushing	> achtergrondwaarde

F7 Elektronreclamatie

Metalen, andere ionen

Bodems die zijn verontreinigd met zware metalen en polaire verbindingen, kunnen met behulp van gelijkstroom worden gereinigd. Bij in-situ elektroreclamatie treden de volgende elektrokinetische verschijnselen op:

- Elektrolyse of beweging van ionen en ioncomplexen (ionmigratie)
- Elektro-osmose of de beweging van water van anode naar kathode (hydromigratie)
- Elektroforese of de beweging van geladen deeltjes

<i>procesparameter</i>	<i>nagestreefd gevolg</i>
pH	<1
temperatuur	30-60°C