

3 2. オランダの地下水涵養

(1) はじめに

“神は世界をつくり、オランダ人はオランダをつくった”の喩えは、国土の 26%が海面下にあるという厳しい自然環境（図 1）にあつて、オランダ人がそれをいかに克服してきたかを端的に表現したものとして、よく耳にする言葉であるが、水利用の歴史においてもこれがよく当てはまるように思われる。その典型をアムステルダムに見ることができる。それは 1250 年頃のこの都市の発祥とともにあるといつてもよい。

往時はアムステルダム川や近傍の運河の水が利用されていた（図 2,3）。しかし都市の拡大、人口の増大はこれらの水源の汚染をもたらし、それを介した伝染病対策と水質対策が大きな課題となつてきた。

1845 年に Vaillant という名の技術者の提案による砂丘地下水の開発が実行に移され、1851 年には Anglo-Dutch Dune Water Company が設立され、1853 年以後市民は安全かつ新鮮な水の恩恵を受けることができるようになった。コレラやチフスは町から消え、水の消費量は劇的に増大した。1856 年には砂丘地帯での取水域はさらに広がり、1877 年には 2 番目のパイプラインが敷設された。現在では 5 本のパイプラインがアムステルダム市と砂丘地帯の間を結んでいる。

この間、河水や湖水からの給水も続けられてきたが、市民は安全な砂丘地下水の給水を望んだため、従来型の給水事業は停滞し、会社経営が難しくなつた。1896 年に市はこれを買収して、あらたに Municipal Waterworks を設立させた。

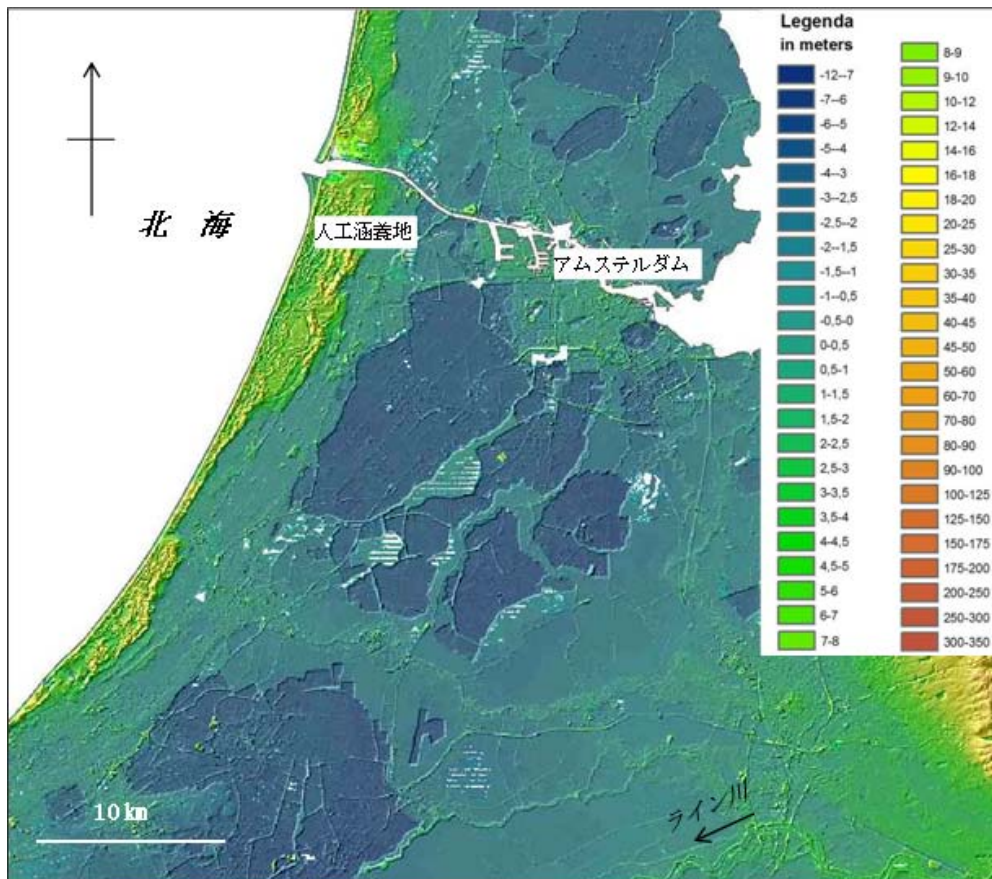
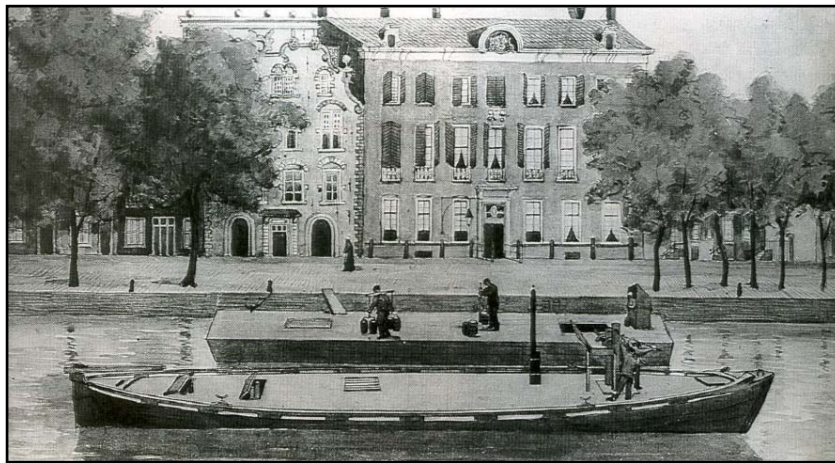
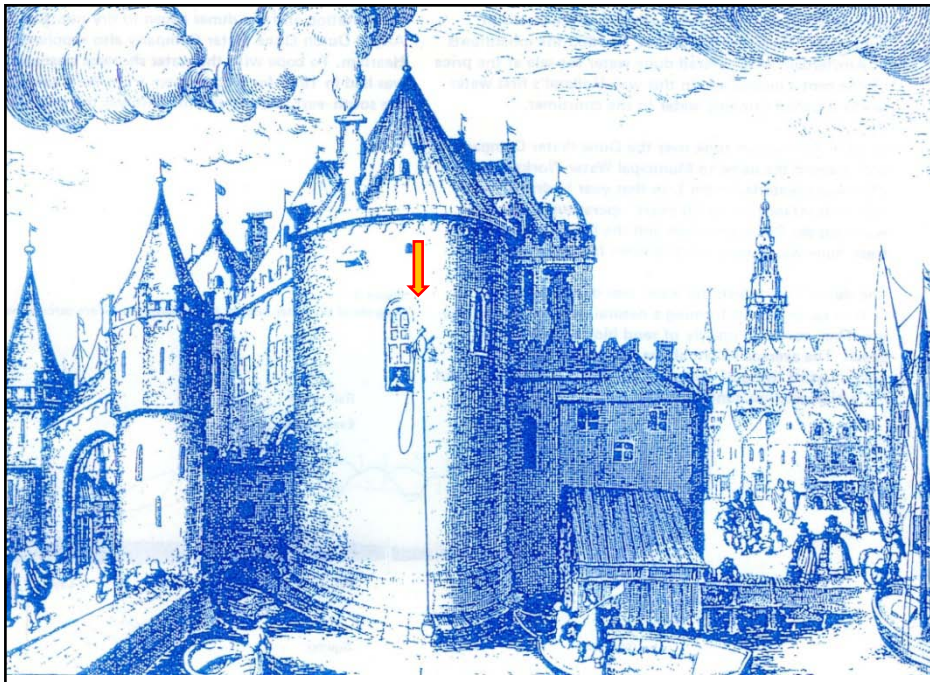


図 1 オランダの地形



1850年以前はアムステルダム市から南へ20kmほど離れたVechtstreek (Vecht area) から河水を汲んで舟で運び、給水していた。しかしこれには衛生上の問題が伴っていた。

図2 往時の“水売り舟” (出典：Amsterdam Municipal Waterworks(1993))



往時のアムステルダム市の中流階層の市民の水利用の様子が描かれている(矢印)。

図3 運河から水を汲み上げている様子(矢印)(出典：Drinking water for Amsterdam(1981))

砂丘地下水の開発の歴史をみると、はじめは砂丘間低地に集水用の溝を掘り込むことから始まり、その後、地下水位の低下を追い駆けるようにして、浅井戸から深井戸へと井戸深度を増加させていったものと思われる。砂丘地下水の水収支のマイナスは、1900年代の終わりごろから目立ちはじめ、場所によっては完全に涸渇してしまったところも出てきた。

一方この頃、北海沿岸の海岸砂丘の水文地質学的研究が進んで、その深部には豊富な地下水貯蔵層が存在することが確かめられるようになり、その例はアムステルダム砂丘^{脚注)}にも当てはまることが明らかにされた(図4)。

脚注：ここでは、この稿で対象としている Zandvoort 地区と、その南隣にある民間経営のトゥエイク(Katwijk)地区をあわせてこのように呼ぶことにする。

1903年には深部地下水の揚水が開始されたが、間もなくこの種の地下水の利用には量的に限界があり、また深井戸の利用には塩水侵入という危険性を伴うことが明らかとなった。このような状況から浮上してきたのがライン川からの導水による砂丘地帯の地下水涵養計画である。

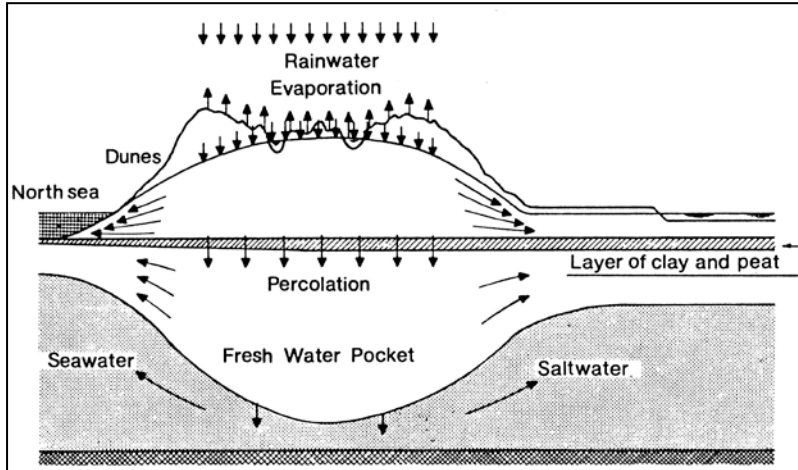


図4 人工涵養実施以前の地下水の平衡状態

(出典：Amsterdam Municipal Waterworks(1993))

アムステルダム砂丘の南北延長距離は約20km、幅は最大4kmである。砂丘列の間には5列ほどの砂丘間低地が南北に延び、その標高は5~6m、また砂丘高は最大13m程度である。

この図にある砂丘本体を上下に分かつ不透水性の地層は水文地質的に重要な役割を演じている(後述)。

(2) ライン川からの導水と浅層地下水涵養

1957年に最初のパイプラインがライン川の支流のレック川から砂丘地帯に向けて敷設され、次いで第2次世界大戦後の水需要の増大に対処するための2番目のパイプラインが敷設された(図5)。

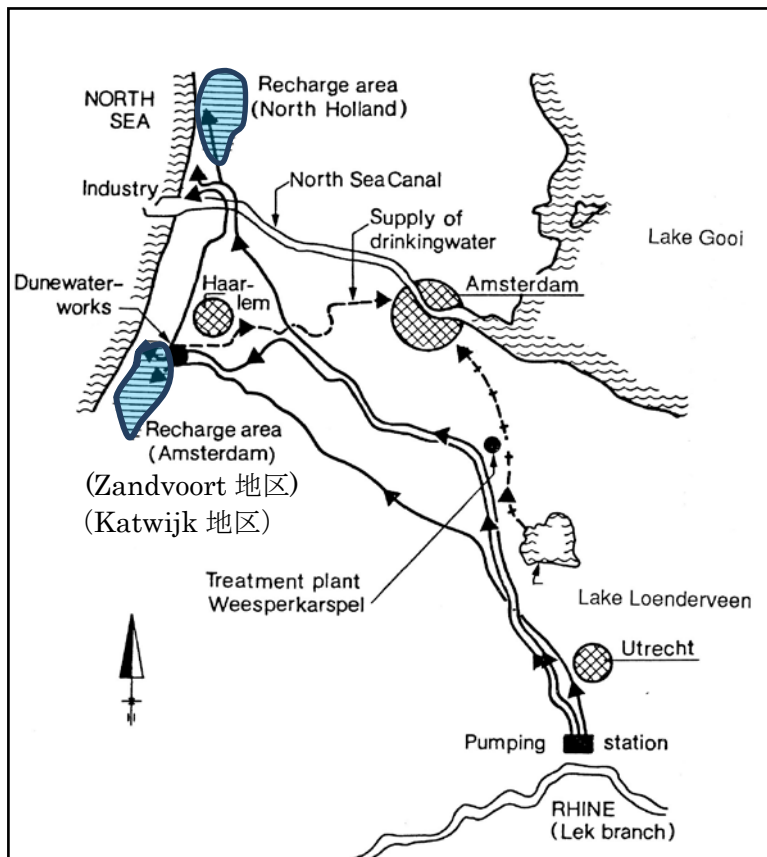


図5 ライン川からの導水とアムステルダム市への給水状況

(出典：Amsterdam Municipal Waterworks(1993))

地下水涵養は北海に面した砂丘地帯の南北2地域でおこなわれている。このうち南部にはアムステルダム市営によるザントフォールト(Zandvoort)地区と民間企業によるカトウェイク(Katwijk)地区の2つの人工涵養地が北海に面して約20kmの距離をおいて立地している。

地下水涵養は北海に面した砂丘地帯の南北2地域でおこなわれている。このうち南部にはアムステルダム市営によるザントフォールト(Zandvoort)地区と民間企業によるカトウェイク(Katwijk)地区の2つの人工涵養地が北海に面して約20kmの距離をおいて立地している。

河水は取水地の Pumping station で凝固剤処理され、沈殿物を取り除いたのち、延長 55 km のパイプラインで砂丘地帯に送水された。なお当初は 40 ヶ所の涵養池から年間 7,000 万 m³ の水量が浅層部に涵養された (図 6、7)。

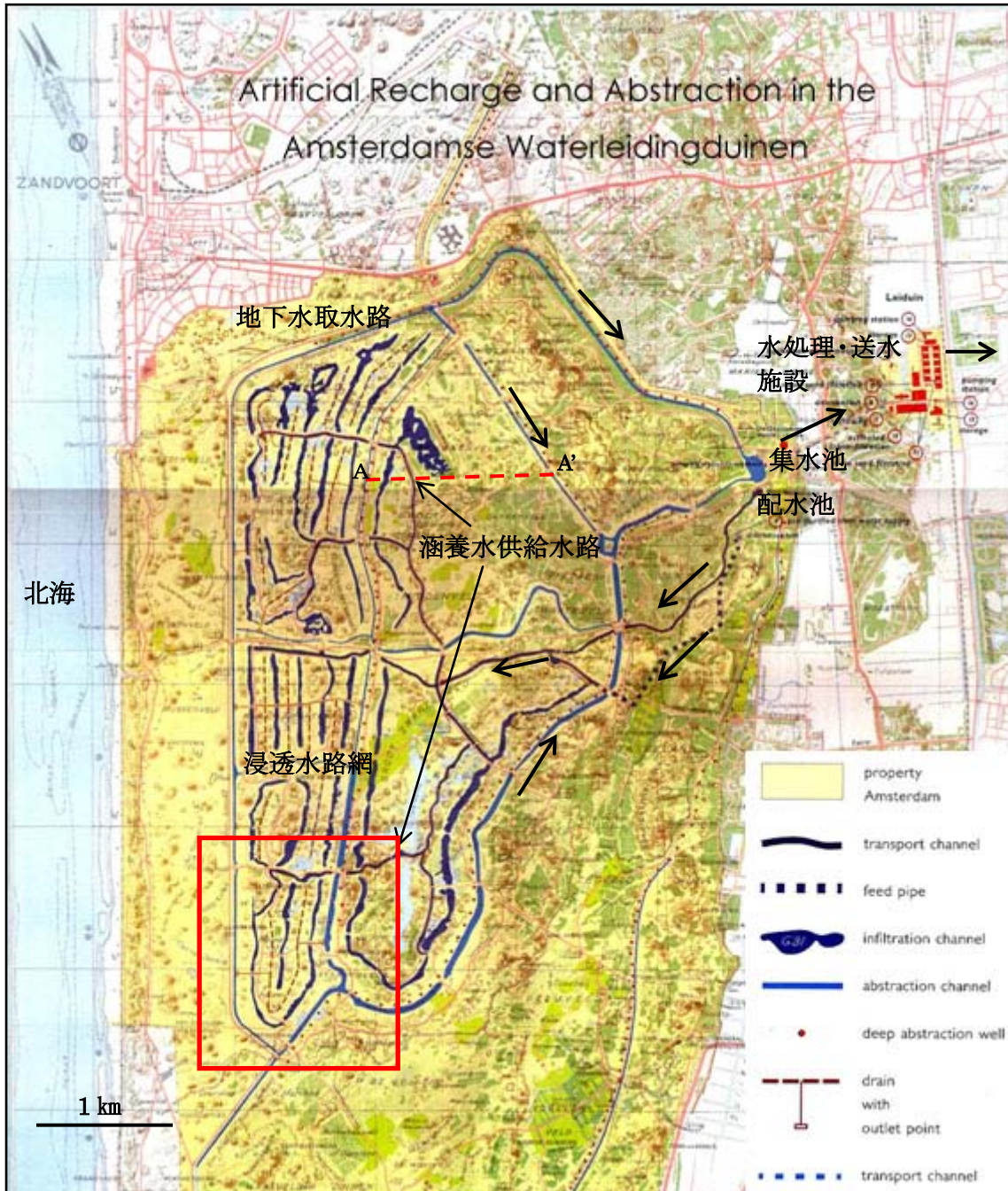
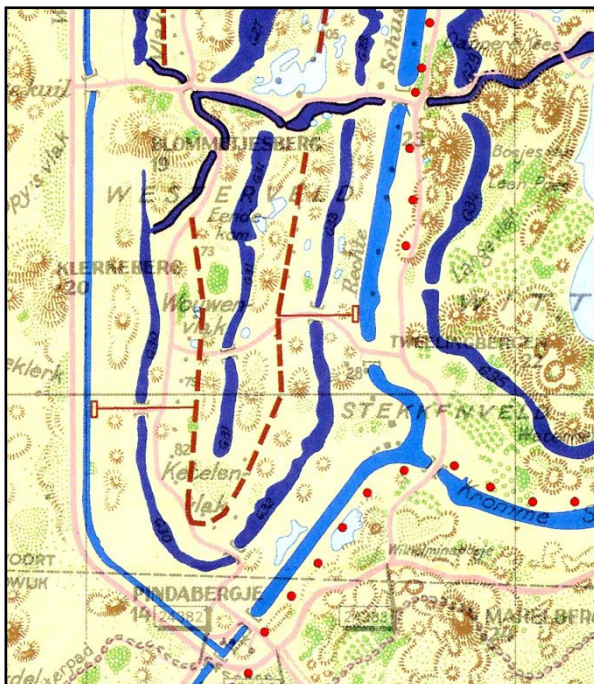


図 6 アムステルダム砂丘の人工涵養 (矢印は水の流れ、赤枠は図 7 に対応、赤点線は図 12 に対応)
(出典 : Amsterdam Water Supply)

涵養水路の多くは自然の砂丘間低地の地形を利用し (写真 1)、かつ本来の植生を残したうえで造成され、小動物の生息環境が守られた。また市民の憩いの場としても自然



景観がよく保存され、管理されている。そのいくつかの例を写真2~5に例示する。なお人工涵養実施以降の地下水の平衡状態は図8によって示すことが出来る。

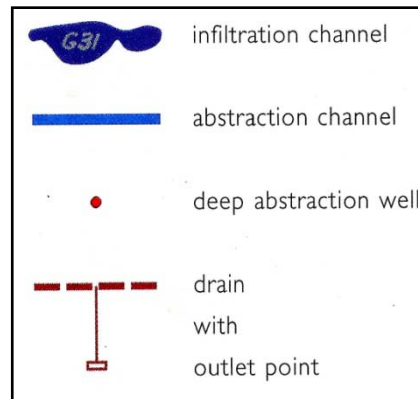


図7 図6の赤枠部分の拡大



写真1 涵養地の全体像 (出典: Google earth)



写真2 涵養地内の植生と散策するハイカー



写真3 砂丘間低地における涵養水路の景観①



写真4 砂丘間低地における涵養水路の景観②



写真5 砂丘稜線部のサイクリング道路

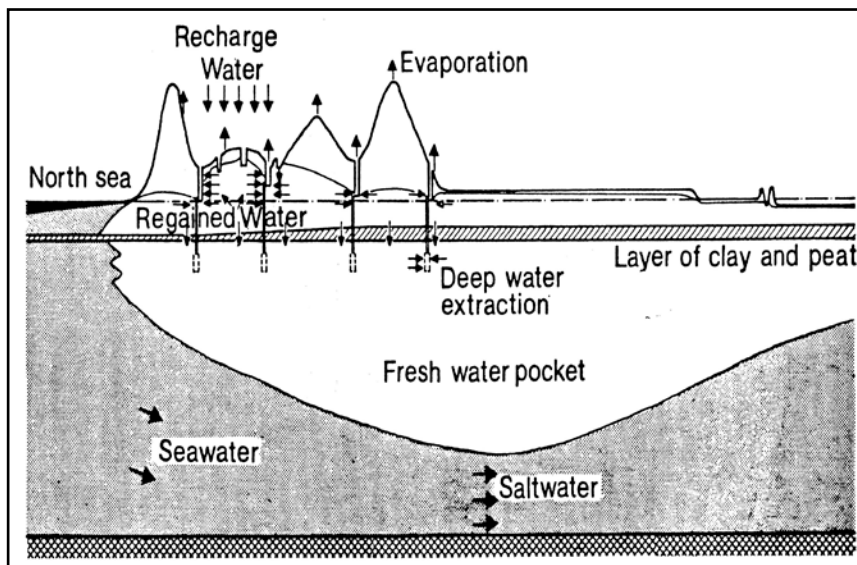


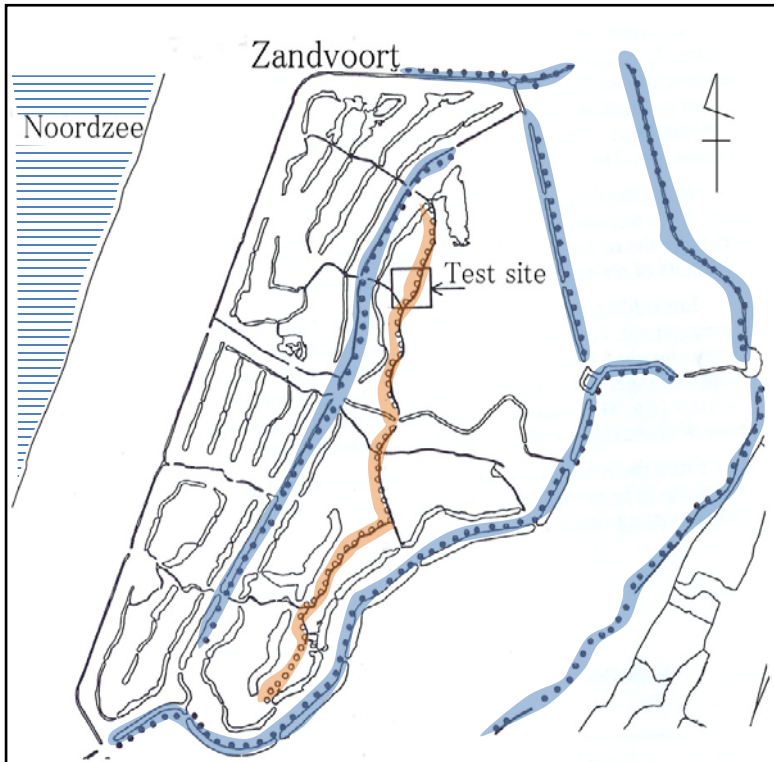
図8 人工涵養実施以降の地下水の平衡状態

(出典：Amsterdam Municipal Waterworks(1993))

Zandvoort 人工涵養地はアムステルダム市の所有地になっていて面積は36 km²である。ここに導水された涵養水の砂丘での滞留期間は少なくとも2ヵ月間である。浸透した水の一部は地表から7mほど彫り込まれた集水路に浸出して集められ、またより深くまで浸透した水は取水井によって汲み上げられて集水路に合流する。

(3) 深層地下水涵養

上述の表層部への涵養の拡大は、それを可能とする帯水層の貯留容量に限界があることが分かってきたため、深井戸を通しての深層部半帯水層への涵養が計画された。図9がその概要で、涵養井戸は涵養水の供給水路沿いに配置され（図中**橙色**で塗布）、取水井は既存のものが利用される（図中**青色**で塗色）。その涵養量は年間 1,300 万 m³が見込まれた。図10はこのシステムにおける水循環の概念図である。また写真6,7はそのTest siteの状況である。



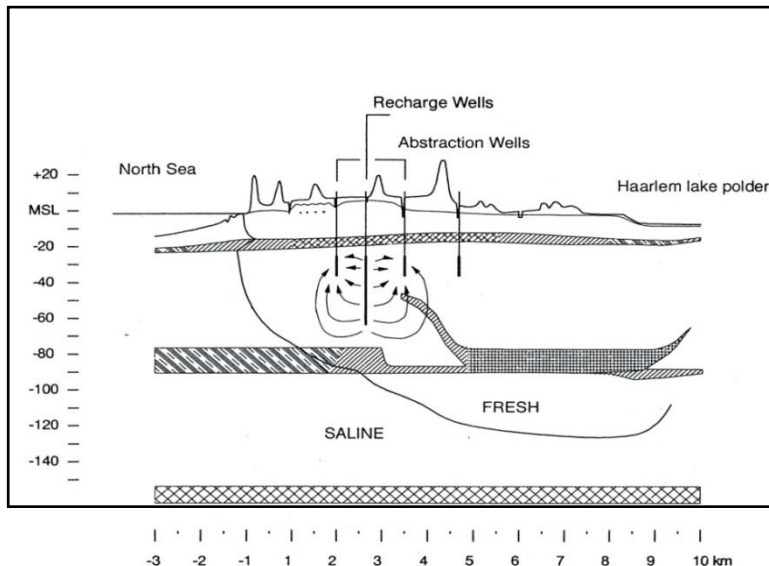
図中 Test site としてある場所はこのシステムの実証試験地であり、まずここで種々の試験を重ね、その試験結果を踏まえてシステムを徐々に拡張してゆくこととしている。写真6,7はこの施設の一部。

図にみるように既設の取水井戸群が深層部への涵養井戸群を取り囲むように配置され、既存の施設が活用されることによる経費削減と併せて、人工涵養施設としては理想的なカタチになっている。

なお Test site における涵養井の深さは約 65m である。

図9 計画された涵養井群と揚水井群の配置

(出典：Theo N. Olsthoorn (1994) :Artificial Recharge by wells at the Amsterdam Water Supply, Artificial Recharge of GROUND WATER, II Proceedings)



淡水は密度の高い塩水の上に乗ったかたちで平衡を保っているため、そのインターフェイスは揚水によって乱され、取水された地下水の水質にダメージを与える場合がある。

そのため半透水性の粘土層またはローム層がスクリーンの位置とインターフェイスとの間に存在することが重要である。

図10 帯水層構造と涵養井、揚水井の関係 (矢印は浸透水の流れ)

(出典：図7に同じ)



写真 6 涵養井(観測孔内の人は案内者の Olsthoorn 氏)



写真 7 観測機器

このようなシステムは既存の浸透水路からの浅層涵養の影響の及ばない距離にあり、涵養井は取水井によって取り囲まれているような配置にあることが望ましい。また同時に涵養量と取水量がバランスしていることが必要である。

なお半帯水層に浸透した水は灌漑水路から取水井にいたる、数 10m～数 100mの距離を少なくとも数か月かけて移動し、その間に浄化される。なおこれらのシステムが自然の地形に沿って、砂丘列や海岸線に直交して配置されているのは、本来の地下水の流動系を大きく変えないためである。

(4) 涵養水路の維持管理

図 6 にあるようにライン川から送水されてきた河水は一旦配水池に溜められ、ここから南北 2 系統の涵養水供給水路によって灌漑地に配水される。配水池は特段の施設があるわけではなく、説明がなければ緑に包まれた自然の池といった感じである(写真 8, 9)。



写真 8 配水池の周辺①



写真 9 配水池の周辺②

浸透水路も先の写真 3, 4 に示したように、自然の景観を維持するように配慮されている。ここで最も重要なことは水路に溜まる沈殿物の処理で、腐植物や細粒物の沈積に

よる浸透効率の低下や水質への影響を避けるための浚渫や、水路床の乾燥などが不可欠な作業となる（写真 10, 11）。



写真 10 通水を止めた後の浸透水路床



写真 11 水を抜いた後の浸透水路床の沈殿物

図 9 のテストサイトでは、涵養井の目詰まりを防ぐために、その供給源となる涵養水路の底面に敷設するフィルターやその敷設方法に関する調査研究が行われている（図 11）。その中心課題は涵養池底面の目詰まりで、これには、①水草や水路際の植物遺骸の腐植による目詰まり、②その際に活動するバクテリアによる酸欠水の発生（特に夏期に顕著）と、④それによる砂丘地下水の鉄分の沈積（写真 12）等が関係している。

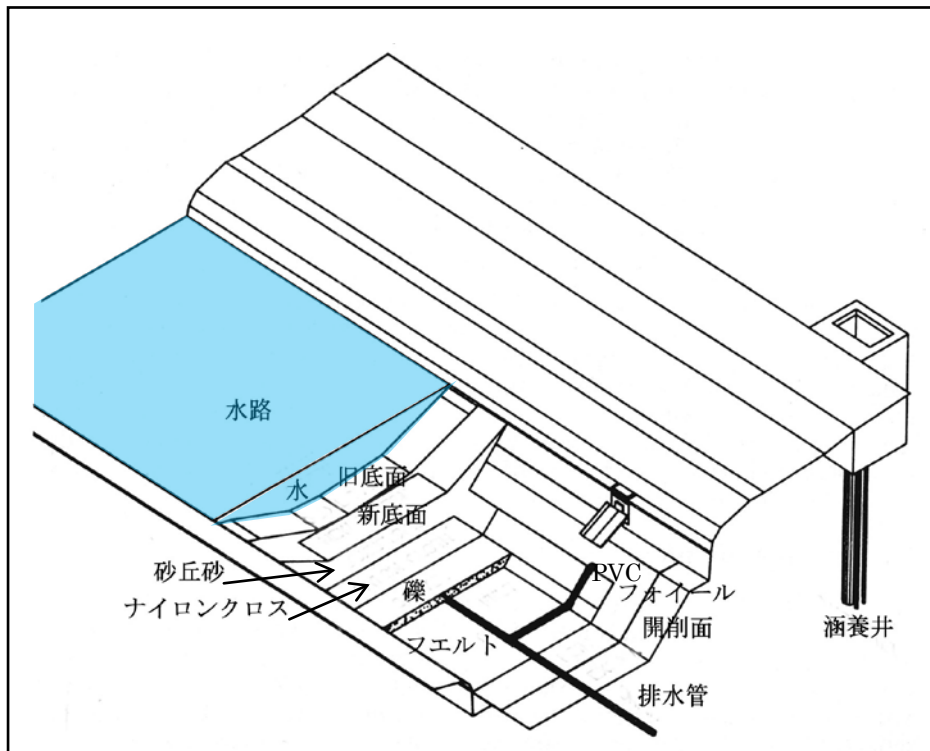


図 11 涵養水路底に設けられた排水システム

（出典：Theo N. Olsthoorn（1994）:Artificial Recharge by wells at the Amsterdam Water Supply,）

ドレインシステムは涵養水路の底部に造られる。なおチャンネルの幅は 8 m、深さは 1 m である。ドレインはチャンネル下 1 m のところに設けられる。このシステムで配慮された点は、

- ① 開水路における生物学的な阻害要因の回避
- ② 開水路における温度変化の回避
- ③ 涵養池底面における有機物の堆積の回避
- ④ 涵養池底面から排水路へ向かう水流の不規則変動の回避
- ⑤ 酸欠水の引き込みの回避

である。そのため、涵養井は灌漑池ではなく涵養水の供給水路に沿って造ることとしている。

なお図中 PVC フォイールは底面と側面からの砂丘地下水の浸入を防ぐために設置される。



水路側面、あるいは底面からの鉄分の多い砂丘地下水は酸素の多い灌漑水との混合によって酸化鉄の沈殿物を浸透水路底に沈積させ、浸透効率を低下させることになる。

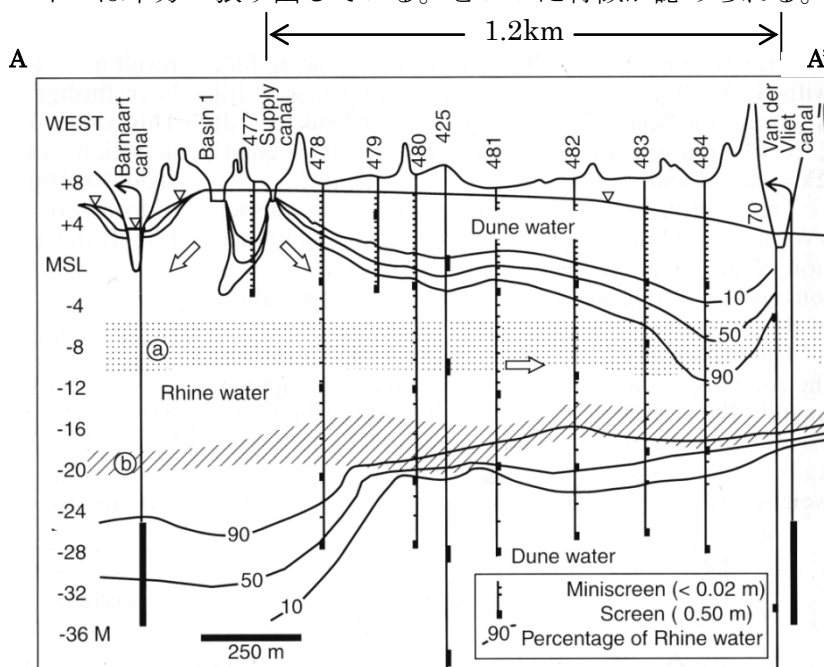
写真 12 水路底面に沈積した酸化鉄様被膜

(5) 砂丘地下水の動態

自然あるいは人工的に砂丘地に涵養された地下水の動態について興味ある報告が Hydrogeology Journal の Volume 7 (1999)に掲載されている。これは人工涵養地内での地下水の動態を理解するうえで重要な情報と言えるので、その一部を以下に加えておく。

図 12 は先に示した図 6 の Zandvoort 地区の人工涵養図中、A-A' 断面におけるライン川原水の砂丘内での空間分布を Cl^- 及び $\delta^{18}O$ の濃度分布をもととして画いたもので、供給水路から排水路までの距離約 1 km 間での涵養水の流動と既存の砂丘地下水とのインターフェイスの状態が示されている。なお砂丘中でのライン川の原水はその Cl^- 濃度、 3H 濃度異常から容易に識別できる。

砂丘内の浅層地下水レンズは、降水の自然涵養を得ながらラインの河水と平衡しつつ、そのインターフェイスは横方向に伸長している。一方、深部砂丘地下水とのインターフェイスは下方へ張り出している。といった特徴が認められる。



涵養水の供給水路から、排水路の Van der Vliet canal までの距離は約 1,000m。
 原水の Cl^- 濃度異常は 150vs25 - 60mg/L、 ^{18}O のそれは -9.4vs-7.5 ‰ V-SMOW である。
 なお図中 a、b は完新世の半透水層。
 上部砂丘堆積物の地下水とライン河水とは、砂丘砂の横方向の分散係数を 0.0025m とした時に実際の混合状態とよく一致する。

図 12 Zandvoort 地区砂丘内における涵養水の分布(1982)

(出典 : Pieter J.Stuyfzand(1999):Patterns in groundwater chemistry resulting from groundwater flow, Hydrogeology Journal, Volume 7 Number 1.)

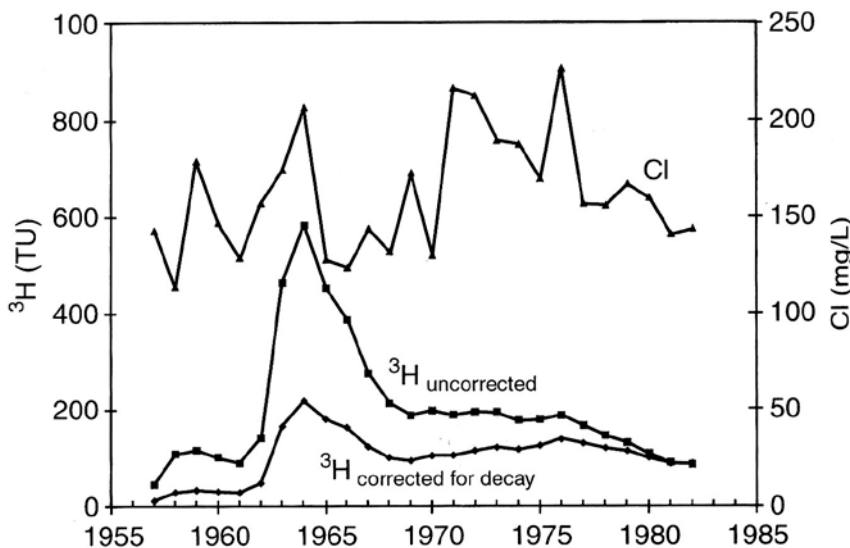
ここで参考までに砂丘堆積物の露頭写真を示しておく (写真 13)。



写真 13 砂丘堆積物

(マクロポアが目立ち全体としての透水性の大きさが推察される)

さて先にも述べたようにライン川からの涵養が始まったのは 1957 年のことであるが、それ以降の涵養水の Cl^- 濃度 (mg/L) と ^3H 濃度 (TU) の変化が図 13 のように時系列で記録されている。また下記枠内の表はそれぞれに異常が認められた年 (期間) との対応をまとめたものである。これらの年はライン河水の砂丘地内での浸透年代の特定に利用された。



^3H の下側のグラフは自然崩壊による減衰を入れた補正值である。

表 1 Cl^- , ^3H の異常値とそれが認められた年代

Years	Cl^- mg/L	^3H TU
1961-1962	145	60
1964	180	200
1968-1969	150	100
1971-1972	212	110
1976	200	128

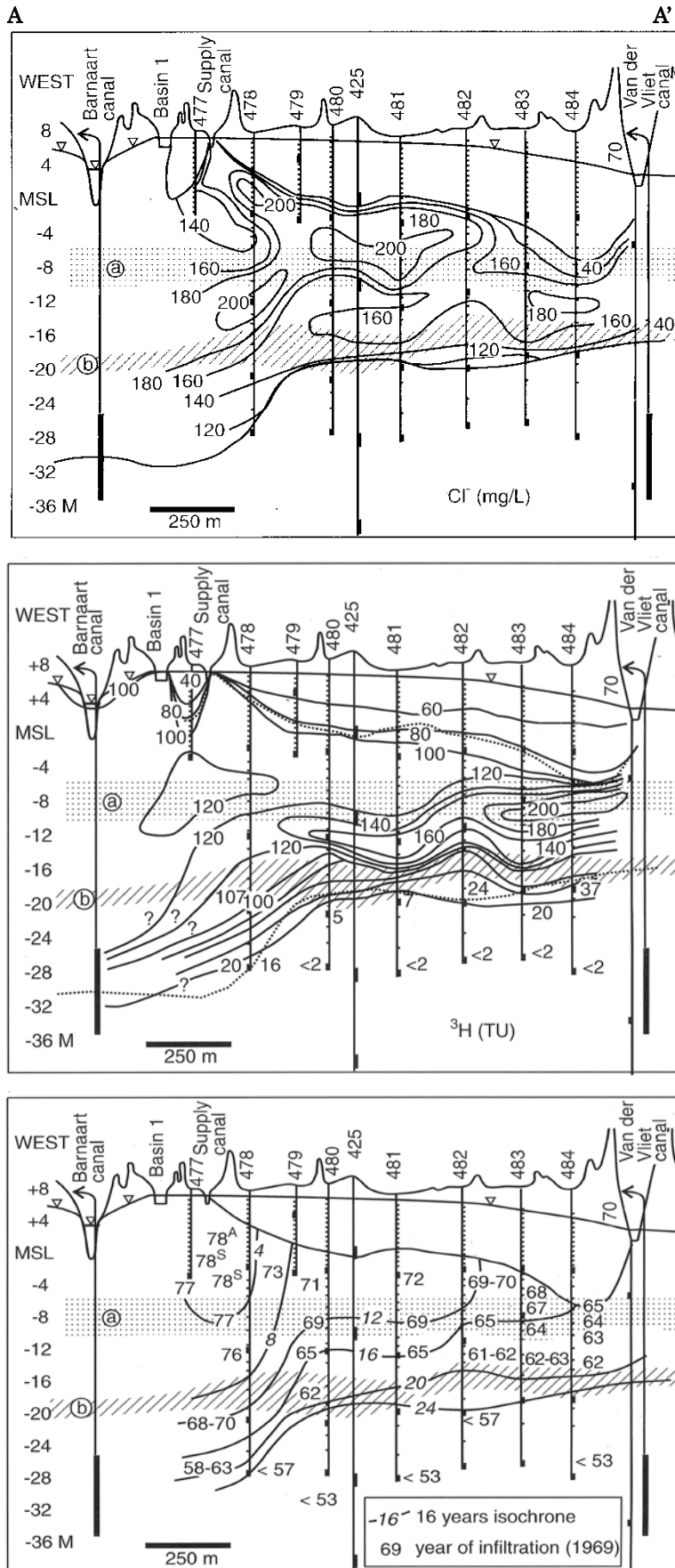
図 13 ライン川原水のトリチウム濃度と塩素濃度の経年変化

(出典: Pieter J. Stuyfzand(1999): Patterns in groundwater chemistry resulting from groundwater flow, Hydrogeology Journal, Volume 7 Number 1.)

図 14 はそれらにもとづいて画かれた Zandvoort 地区の A-A'断面 (図 6 参照) におけるライン原水の塩素濃度とトリチウム濃度の分布、及びそれらから導き出された 1981 年時の年代分布である^{脚注)}。図から砂丘内地下水の動態が以下のように明らかにされる。すなわち、

- ① 地下水の流動は上部帯水層において速く、半透水層部分で著しい遅れを示す。

脚注: 図 13 にみる異常値をラベルとして得た表 1 の結果にもとづいて作成したもの。なお 1953 年以前に砂丘内に浸透した地下水は $^3\text{H} < 1 \text{ TU}$ としている。



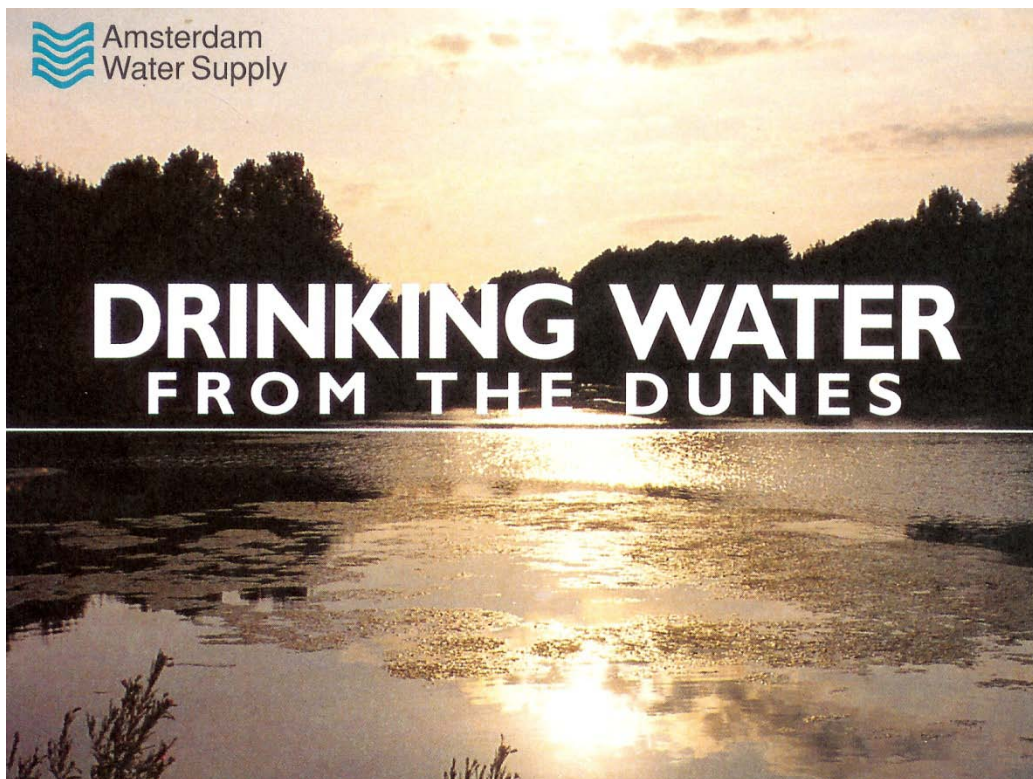
② ^3H において 1964 年の濃度ピークのトレースをみるとシャープな水平分布を示しているのが注目される。これは砂丘砂層の縦方向の分散係数が横方向に比べて小さい点や、上下に重なる半透水層の顕著な異方性を反映している。

図 14 図 6 中の A-A'断面における Cl^- , ^3H の分布と、それに基づくライン原水の年代 (出典: 図 12, 13 に同じ)

(6) 追記

海岸砂丘への人工涵養はひとり地下水の利用という面だけではなく、後背地への塩水の侵入を防止するという側面も有している。図1の オランダの地形にみるように、後背地はかなり広い地域が海面下に入り、その大半を占める農地を塩水化から守るうえでも淡水レンズの保持は重要な意味があるからである。

本文は平成7年に財団法人北海道河川防災センターによって企画実施された「環境保全対策と環境デザインに関する先進事例見学ツアー」に参加させていただいた時の記録をもとに、筆者の知見を加えてまとめたものである。



(Amsterdam Water Supply (1994))