



丹麦的饮用水供应

许多年来丹麦水务工作未遇挑战，然而在1970年代几个隐患开始浮现。1975和1976接连两年遭遇酷暑，许多大城市附近的河道纷纷干涸（不包括排污道）。

在1970年代，一项重大挑战出现，它就是如何规划、管理水资源，保证地表水和地下水的开采在环境可承受范围内进行。从地表水直接取水的方式被逐渐废止，而地下水的开采也需遵循规范，确保每条河流至少达到最小径流值，主要措施是迁移所有河岸及湿地附近的取水井。此外，饮用水供应商必须推行全面的节水计划。

过去35年中，另一个对供水安全的重大威胁是水污染，包括农业造成的饮用水源氮污染，原有废弃物和油桶的化学物污染，工矿企业的有毒物污染以及城市和农田的杀虫剂污染。





背景：丹麦饮用水供应基本概况

丹麦的国土面积为43000平方公里，人口为550万，自上次的冰河期始，便有人类活动痕迹，5000余年前人类就在此耕作。

第四纪沉积覆盖了丹麦大部分国土，其下是白垩土，石灰石和第三纪黏土及沙土。此外丹麦地势低洼，最高点的海拔为172米。这种地势条件以及分布广泛的稳定及非稳定含水层使得开采地下水极为容易。

丹麦农业极为发达，化肥和农药使用广泛。丹麦2/3的地区为农场，猪肉产量巨大，每年有250万头的出栏量。同时50万头的奶牛年均产奶500万立方米。因而来自农业的污染对饮用水供应构成了不小的挑战。

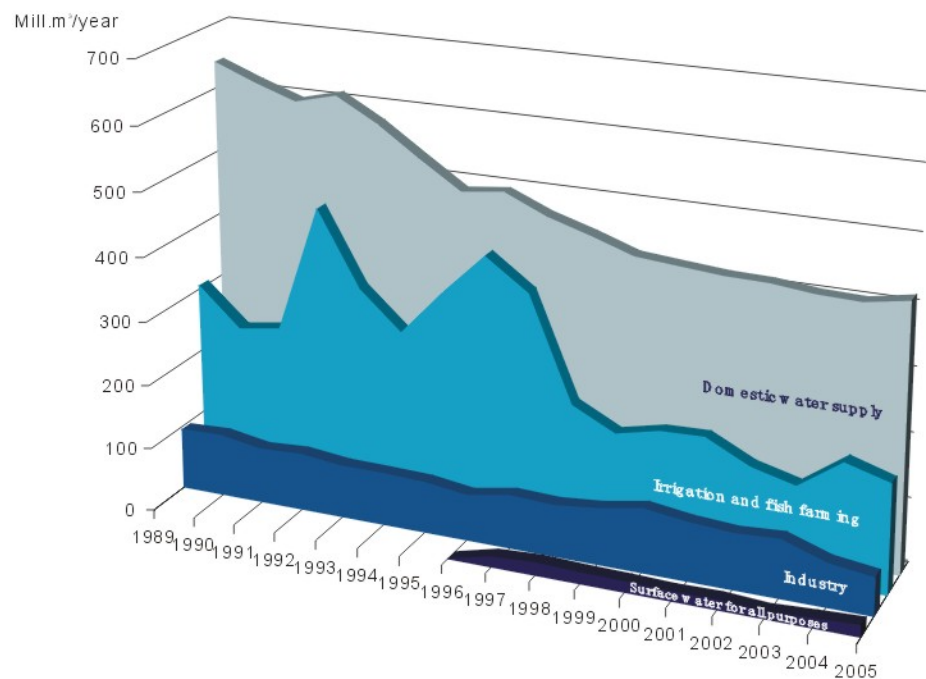
丹麦的饮用水全部取自地下水。政府力保饮用水完全来自地下，并且只需简单处理（曝气，PH值调整，过滤）便能饮用。每年有8亿立方米的地下水被开采，而年补充水量为100毫米，波动幅度在50-350mm之间。

总的来说，位于深层含水层的地下水水质优良，因而避免了复杂昂贵的处理工艺。除哥本哈根因由长距离的输水管线外，其它地区的饮用水都未加氯处理，自来水水质甚至优于瓶装水。

然而，许多浅层含水层受到地下水污染，特别是氮和农药污染。近几十年来，许多取水闸关闭，迫使人们往深处钻井或向临近地区买水。

丹麦地下水开采

1989-2005





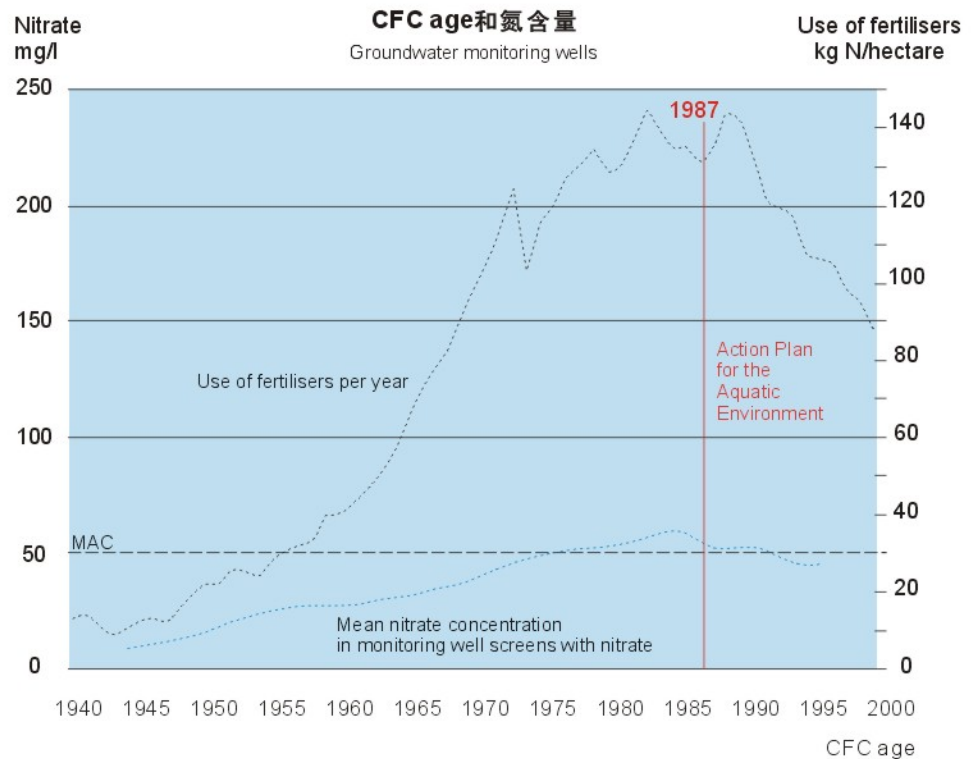
水环境行动计划：减排氮和磷



20世纪以来，随着农业产业化，越来越多的污水排入江河湖海，同时家庭，工业和灌溉用水不断增加，致使丹麦面临水荒。1970年代，人们纷纷意识到地表水干涸的原因。在1987年丹麦议会通过了《水环境行动计划》，目标在五年内减少水环境中50%的氮排放和80%的磷排放。通过大规模的公共投资和污水处理厂改造，磷减排目标在五年后很快完成。但氮减排目标始终未能完成。



在1986年，第一个农药行动计划启动，此后又出台了两个行动计划。最近的一个于2003年启动，实施期为2004-2009。主要目标是减少农药的使用以及其对健康和环境的影响，同时还涉及地下水保护。为此使用的农药类型有一些调整，一些从前污染过地下水的品种退市。尽管已取得一定进展，但最近的行动计划尚未完成，相关评估尚在进行中。



水资源仍在被过度开发

在1988年环境部通过监管水质和自来水厂法令中引入了已开采地下水的监督机制。现在地下水开展过程中的所有重要参数都经过分析。

为减少地表水使用，降低环境影响，任何用途的地表水都逐渐停止供应，由地下水取代。开采地下水需要许可，定期需重新审核，同时每年开采额需报备有关部门。饮用水最长许可年限为30年，而灌溉许可只有15年。



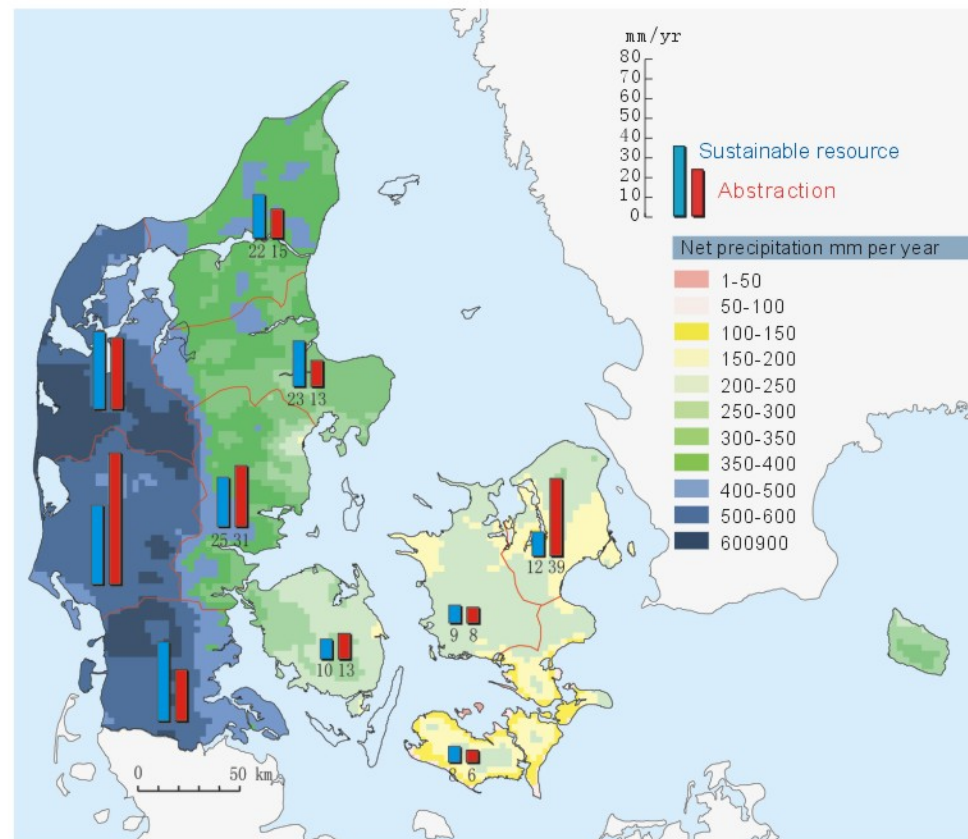
在过去的20余年中，水消费税的征收和节水计划促使地下水开采量减少了1/3还多。然而，水平衡依旧未恢复，地下水仍处于过度开采状态，特别是在人口最为密集的丹麦东部。



地下水氮污染使得开采较浅含水层的许多供水厂关闭。而农药污染，尤其是郊区，导致几个主要取水点关闭。废弃物和其他点源污染源则使得几个供水井关闭，最后一些供水厂因过度开采地下水，而遭受镍污染。



从1991-2005，因为农药及其降解物污染，共有1306个供水井被关闭。现在每年仍有接近100个井因含农业而被关闭。



执行欧盟指令所面临的挑战

五项欧盟指令均针对丹麦地下水水质面临的问题：

- ◎ 氮指令
- ◎ 水框架指令
- ◎ 地下水指令
- ◎ 饮用水指令
- ◎ 农药指令

氮指令规定，正常情况下，地下水中氮浓度不能超过50mg/l。



依据水框架指令和地下水指令，所有地下水水质都必须为优良。这就意味着，以下标准都必须遵循：



- ◎ 氮 < 50mg/l
- ◎ 农药和降解物 < 0.5 μg/l
- ◎ 污染物浓度不可超过适用范围内的欧盟任何水质法规。
- ◎ 地下水水质不可使影响相关水体（地表水）水质，使其不能达到设定的环境目标；也不可降低相关水体的生态和化学品质。对于依赖地下水的陆地生态系统，也不可对其构成重大环境损害。
- ◎ 地下水体如有电导率改变，不可由盐水或其他物质渗入导致。



此外地下水位必须保证相关河流的最小径流。

丹麦全境内共有385个地下水体，分布于4个流域区内。

饮用水指令的实施部分设定了一系列最大允许浓度值（MAC），分别针对饮用水中的重要化学元素。由于用于饮用水的地下水只经过简单处理，所以许多MAC值与地下水保护高度相关。

丹麦建立特定地下水保护区的基础—水文地质绘图

1994年丹麦政府出台了保护地下水和饮用水的政策，其中有10个要点，内容涵盖地下水开采区域的分级，对具有较高饮用水价值的地下水区域进行保护。

1994年丹麦政府出台的10点计划

1. 对健康有损及对环境有害的农药必须退市
2. 加征农药税—农药使用量必须减半
3. 2000年前氮污染必须减半
4. 鼓励有机农业
5. 保护饮用水源区的特殊利益
6. 新土壤污染条例—清除废弃物处置场
7. 造林及土地修复以保护地下水
8. 巩固欧盟成果
9. 加强地下水及饮用水水质管理
10. 与农民及其协会进行沟通



到1997年底，丹麦根据饮用水价值将各地区划分为以下等级：

高饮用水价值区域，具饮用水价值区域和低饮用水价值区域。



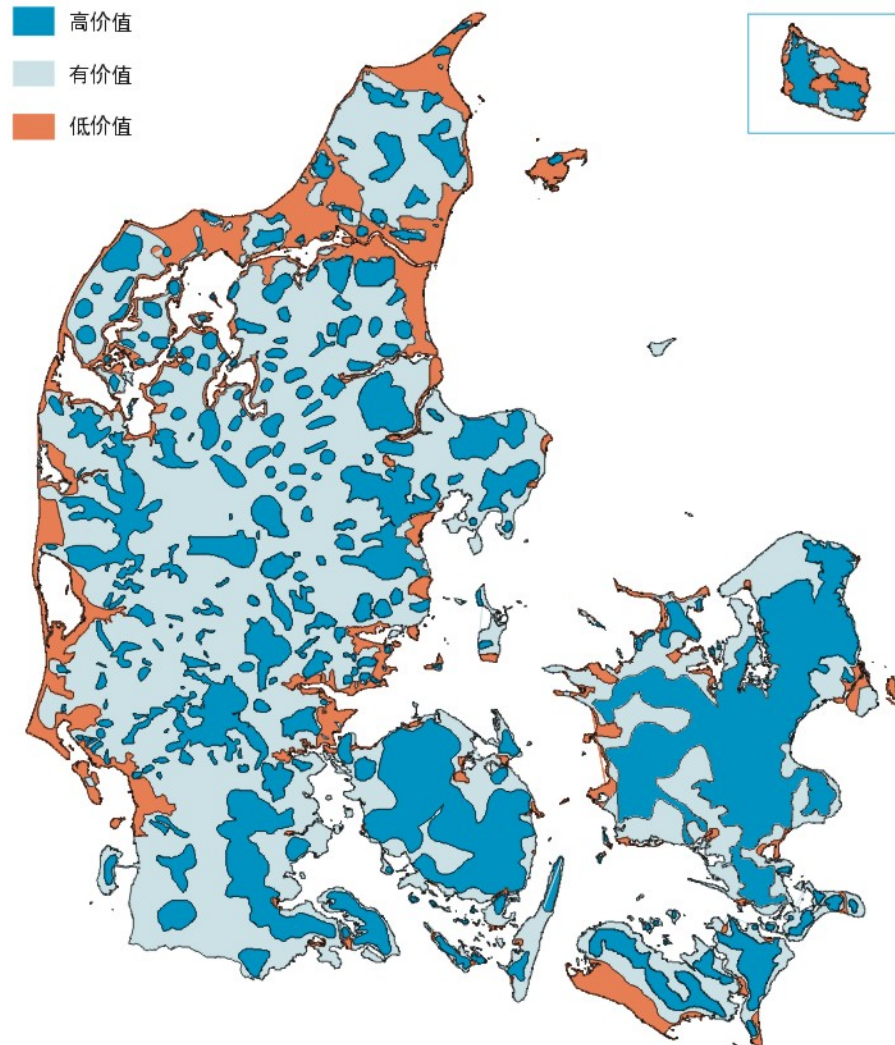
该分级以地下水资源的质量和规模为基准。1998年，40%的丹麦地区（17000平方公里）已被划为高饮用水价值区域，成为公共水务工程的所在流域。一项空间深度水务地质绘图工作也在此时展开。自来水用户需支付0.07欧/立方米的额外收费，一个四口之家需为该测绘工作支付12欧/年。

水文地质图将用于地下水特别保护区的建立，同时为土地利用法规的起草提供依据，避免地下水污染。



建立地下水特别保护区的基本理念是保护较其他更为脆弱，更易污染的地区。目标是将特地区域细分，根据不同的目的和用途，划分出不同潜力的次级地区。

地下水资源分布图





丹麦地下水特别保护区战略的实施三步骤



1、采用最新的地球物理勘测，勘测钻探，水质采样，水文建模等技术，绘制空间深度水文地质图。该图将为地下水特别保护区的建立提供参考。而该保护区将针对地下水补给地区的点状源及非点源污染源，取代过去采水井附近的传统保护区。根据当地水文和化学条件评估其易受污染的程度。



2、绘制及评估过去、现在以及未来可能的污染源，包括点源和非点源。

3、为行动计划的出台作预备。该计划将以政治意愿为指导，规范未来的土地利用和污染治理工作。公共规划程序将对计划进行评估监督，全过程透明，并有公众参与。此外行动计划必须报告实施时间表和具体负责人。

丹麦已成功地将供水井以点源方式进行了保护，采用的手段有净化污水，建立两级





保护区。保护区内包括围绕井周，以栅栏为标记，直径为10米保护区，以及300米长的保护区。地下水特别保护区涵盖整个地下水补给区，重点保护取水区。保护区的建立，将充分计算地下水流模型，来自点源和非点源污染物降解程度，同时兼顾当地地理和地质化学情况。



建立此类保护区对水资源图的绘制提出了极高的要求，因为对该区域内各类活动的限制必须合理适度。丹麦的第四纪地理构造十分复杂，现有的地质图大部分采用钻井所来的信息。所以过去的传统图纸不够详尽，无法精确绘制取水区。新近的绘图计划包含建立地质和水文概念模型，用于分析地质情况，确定取水区和污染风险。模型精度为250米（对应地球物理平均测量线）。在过去的15年中，由DHI开发的MIKE-SHE的模型被用于大部分地区的建模。



在地球物理数据的收集和分析方面，位于Aarhus大学（隶属丹麦环境部）的HydroGeophysics小组与GEUS的合作发挥了重要作用，保证了成果的高品质。HydroGeophysics小组深入研究，不断改善测量方法和数据分析方法。而大规模的测量计划则证明现今的地球物理测量是廉价有效的，可将地质图上各取样井之间的空白补充完整。实际的测量和结果分析工作由咨询公司承担。地质测量的结果验收工作由HydroGeophysics小组负责，同时它还承担分析项目的编程工作。所有测量数据最终提交给位于GEUS的国家地球物理数据库GERDA。

Aarus大学研发的有效水文绘图法，特别在地球物理领域，达到了3-D绘制地下水体的国际领先水平。直升机辅助的SKYTEM法对于绘制地下水出水点尤其有效，因为该方法可以空速30km/小时的速度扫描深达300米的地质构造。



水质监管项目

NOVANA项目包括以下监测内容：

- ◎ 空气质量和大气沉降物
- ◎ 点源污染（污水排污口）
- ◎ 地下水
- ◎ 农业流域（包括地下水）
- ◎ 湖泊
- ◎ 河流
- ◎ 海岸和海洋水域
- ◎ 物种和陆地自然类型

《水环境行动计划》的部分内容是在1988年建立水质监测项目，现在称之为国家陆地和水环境监管和评估项目（NOVANA）。

针对每个主题，都要相应的技术指导，在地下水方面，指导涵盖取水井的钻探和设计，取水和采样，过滤，实地测量，数据分析，报告等。

自1988年起水质监督项目开始运行，每五至六年调整修正一次。目前的NOVANA项目正在执行2004-2009年计划。为符合欧盟水框架指令和地下水指令，该项目已进行了一次调整。

由于丹麦的饮用水完全来自地下水，因而地下水水质监测对丹麦社会意义重大。丹麦有超过62%的地区为农业区，因而政府认定整个丹麦均易遭受氮污染，相应的地下水监测项目也应覆盖全境。

丹麦地下水监测项目包括供水井监测，地下水监测网络和农业流域监测。

地下水监测是一项细致的分析项目。70个流域集中在一个监测网络下，从中选取1415监测井，又从五个农业流域内挑选100个浅层监测井，进行取样分析。水质分析包括的项目有：97种化学指标，其中26项常规指标，14项重金属指标，23项有机微污染物指标和34项农药和降解物指标。来自大约6200口公共取水井的数据是水质管理的基础，同时管控也是地下水监督的一部分。

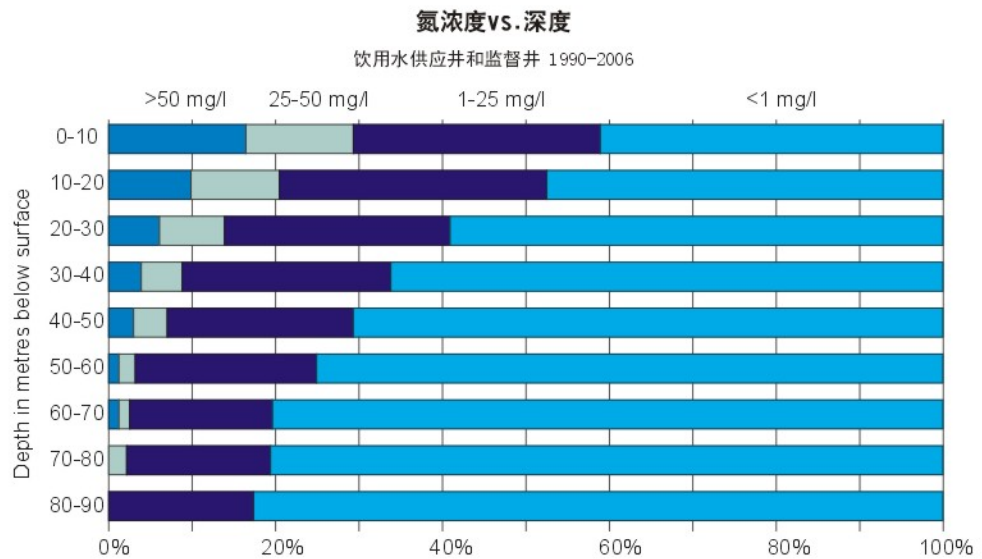


氮造成的威胁

供水井通常装有long screen，旨在提供主要地下水库的氮分布浓度样本。然而，来自取水井的数据无法反映实际情况，因为饮用水浓度必须低于最低运行浓度（MAC）值，氮为50mg/升。



而地下水监测井则可提供更为准确的氮污染数据。从1998-2004年，16.9%的水井氮浓度轻微超标，60%的井不含氮（<1mg/l）。



在过去的半个世纪中，化肥的使用量增长惊人。在监测井中发现地下水含有CFC（氟氯有机物），氮浓度的最高值反映了化肥用量的增加。而数据同时显示，自1979年农民改变施肥方式起，氮污染呈下降趋势。

镍和砷的挑战

丹麦沿海地区的地下水中氯含量很高，同时，从曾被远古海水浸染过的含水层取水，也遭遇同样的问题。丹麦附近的海水水位随时间变化很大，许多含水层内还残存着远古海水，诸如从石器时代早期到间冰期的海水。

地下水含盐的挑战

影响最为广泛的无机微量微量元素是镍，来自于黄铁矿，镍黄铁矿等重金属硫化物的氧化。2001年丹麦立法通过欧盟水框架指令，对砷的关注也日渐增多，因为在指令中MAC值从50 μg/l下调至50 μg/l。监测项目中9%的监测井采样结果都超过5 μg/l。幸好很大一部分的镍，砷及其他微量金属会随铁一起沉淀，最终留存在沙过滤池中。



农药和其降解物的挑战

在超过25%的供水井和监测井中都发现了农药和其降解物。



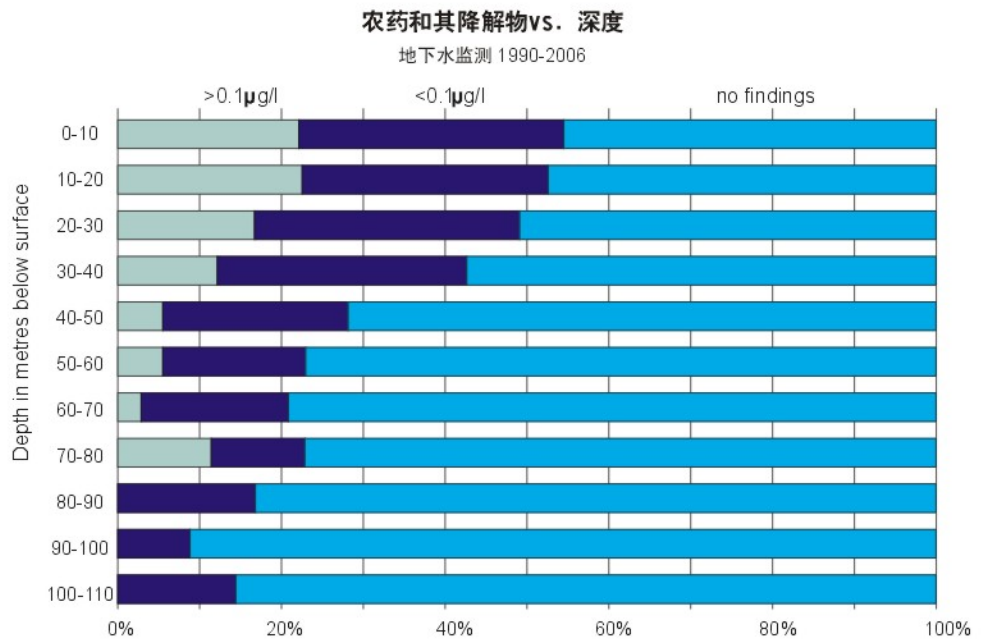
最常见的农药种类为敌菌灵和它的代谢物。通常这些化合物在农用地和城区都有使用。而在农业流域已登记的农药种类中，敌菌灵和它的代谢物大约占了一半。

对于供水井，分析数据显示2,6-dichlorobenzamide(BAM)的出现频率极高，它是农药敌草腈的代谢物，在1969-1996年间作为主要除草剂，用于未开垦的土地。可用于城区，道路两旁，农场，果园，私人住宅出入处，休耕地和复耕前的闲置地等。自1996年起丹麦禁用敌草腈。25%的井含BAM,10%的浓度超过饮用水MAC值 $0.1\mu\text{g/l}$ 。



监测结果显示在40-50m深的井中，最易检测到农药，随深度的增加，可监测的农药种类逐渐减少。

预计随着对农药使用限制性措施的出台，将有效的减少农药对地下水的污染风险。



地下水模型

通过水文模型来评估水量平衡和地下水渗透情况是本监测项目的一部分。

其主要目标是增进对流域范围，水资源区的水量平衡和可持续性水资源情况的了解。预计NOVANA模型将对数据及其数据整合提供质量保证，同时对多个理论模型的数据不一致性作出必要反应调整。



该模型将为有关方面提供最为详尽可靠的信息，因而在制定水资源利用战略时，能把气候，土地利用和开采等因素纳入考虑。未来该模型将作为区域模型的框架条件。目前的NOVANA模型覆盖丹麦全国，水平精度为500x500m。



降低农业因素对地下水水质影响的最佳措施

Aalborg市位于丹麦Jutland州的北部， Drastrup供水工程是该市的两大主要供水设施之一。市政供水需满足大约十万人的日常用水，其中Drastrup负责全年300万立方米供水量的30%。



Aalborg四周的石灰岩含水层透水性极好，含水丰富。然而该岩层几乎无任何阻隔，缺乏保护性黏土层。在Aalborg的附近农业区，含水层上部遭受非点源氮的全面污染。新产的地下水含氮量也因此增至100-130mg/l，幸而通过与深处地下水混合，水质尚能保持在50mg/l的欧盟氮上限以下。

必须减少作物根部的氮外漏才可保证供水项目的投资和营运。

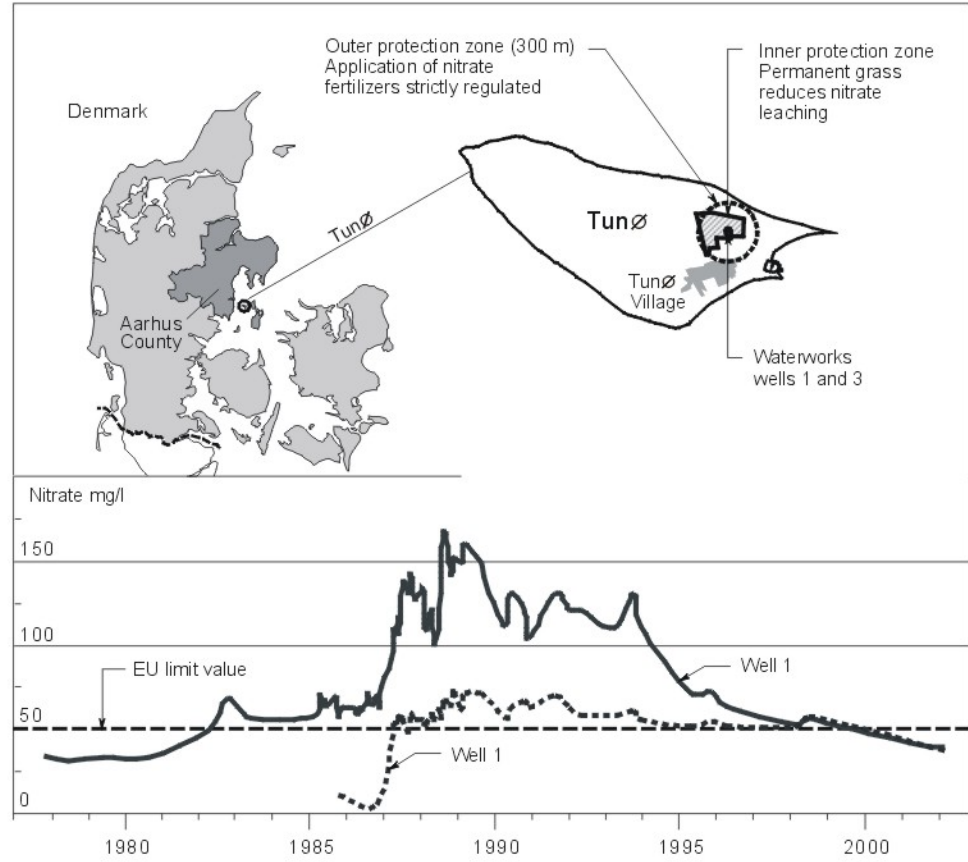
1992年Aalborg市议会通过了针对未来土地利用的统一规划，其内容涵盖：

- ◎ 树林，永久草地，环境友好型农地等可持续型土地
- ◎ 乡村休闲区
- ◎ 禁止新污染源
- ◎ 根除致污原因

变更土地用途，采取自愿原则。在1997年至2001年间，市议会实施了一项计划，旨在重新分配土地。希望维持原农作方式的农民将在规划区以外获得土地，原土地由当地政府收购。与此同时，农民可自愿加入环保协议，以限制各户氮，农药等化学物的使用。在丹麦森林与景观研究所的配合下，三个植树造林项目分别展开，用以尽量减少化学物对地下水的污染。

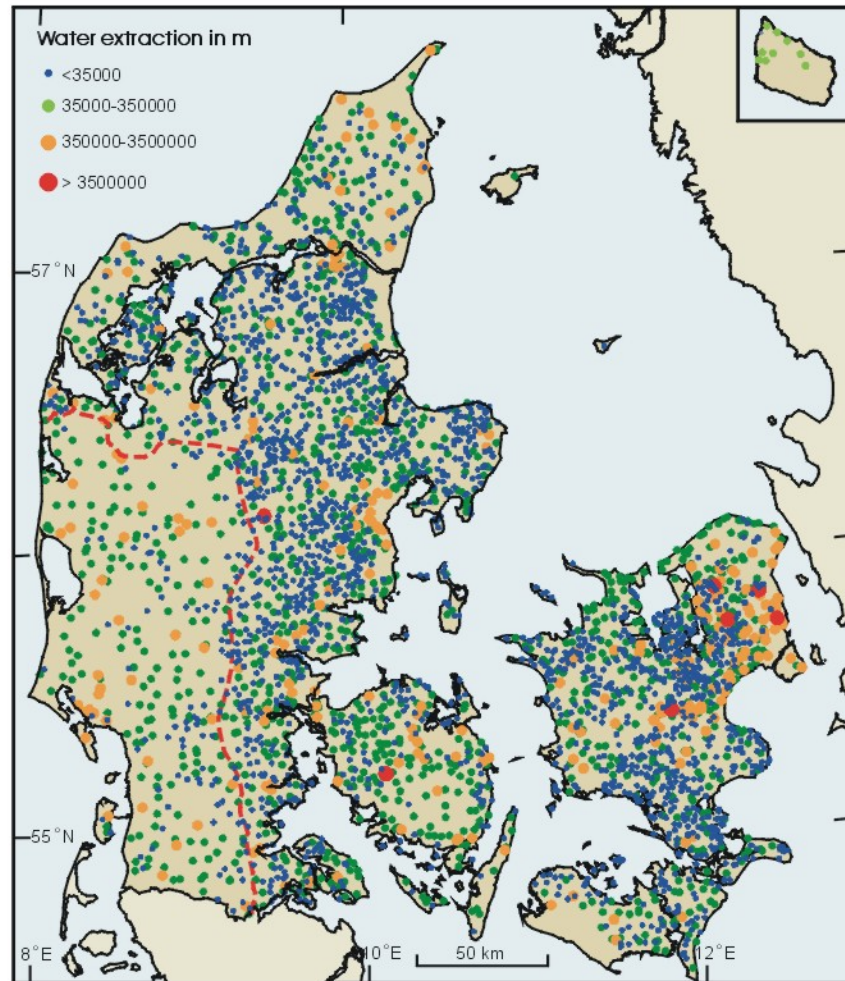
大约450公顷的农地被改造，成为树林或永久草地。这些新树林，永久草地和处理过的鹅卵石滩成为广受欢迎的休闲区，甚多游人来此野餐。

自1986年以来，项目规划区内的地下水一直受到水质监控。在新辟的林地和草地区域，地下水的总氮污染明显降低，尽管水库水质依旧堪忧。此外，农药的污染威胁也大大减少。



Drastrup流域的新行动计划正在实施之中。该计划将投入更多资源，保证保护措施持续开展。

建立特别保护区，并为其制定土地利用规范，已证明在恢复Tuno岛上被污染的供水系统方面行之有效。大约12年前，岛上的唯一含水层被氮严重污染，亟待采取措施加以保护。经测算，建立保护区和引入相应法规将比购置水处理设备更为经济有效。自1990年起，特别保护区的成效一直在监控中，含水层上层的氮含量已降至欧盟上线以下。预计几年内，含水层水质将全面恢复到可接受范围内。土地利用规范特为保护区制定，由于采用综合评估方法，土地所有者均接受此类规范。



细致调查水供应

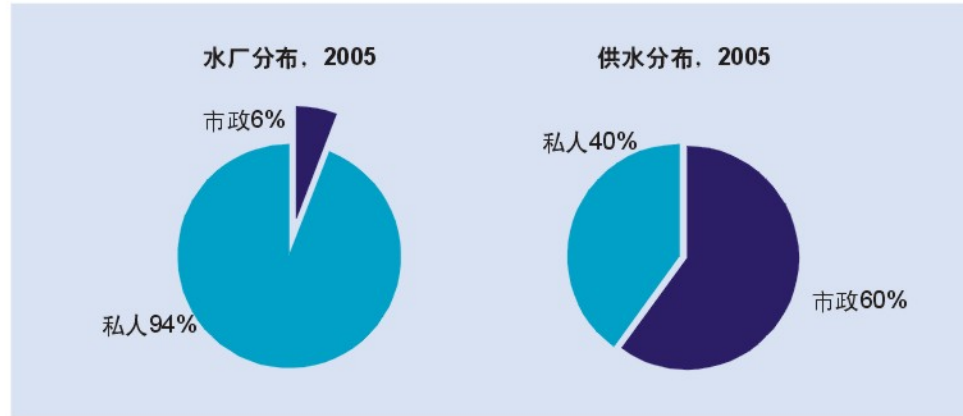
丹麦公共水供应管理

丹麦的规划和公共管理由三级政府分别承担：它们是国家，地区和市政府。国家通过立法，7个环境中心依照水框架指令规划水资源，地区行政单位负责原有污水排放点和其他水污染的治理工作，各市政府负责地下水开采执照的审批，此外还必须保护水资源，使其免于被污染。根据水框架指令制定的水资源规划，要求通过统一规划，综合评估及水保护措施来规范地下水和地表水的使用，既要满足用水需求，同时又不破坏自然环境。分布于各地区的国家环境中心撰写《水资源规划》，以此规范地下水开采执照的管理工作。《水资源规划》是98个市政府分别起草《水供应和保护规划》的框架。

为满足欧盟对水质和用水效率的要求，丹麦对水供应的调整从未间断。从1980年到2005年，平均每年有52个供水厂因污染或产能落后而关闭。在2005年，丹麦共有158个公有供水厂和2464个普通合资水厂登记在案。这些供水厂开采地下水，提供了丹麦大部分的饮用水，只有大约五万家庭拥有自打井和浅层钻井。



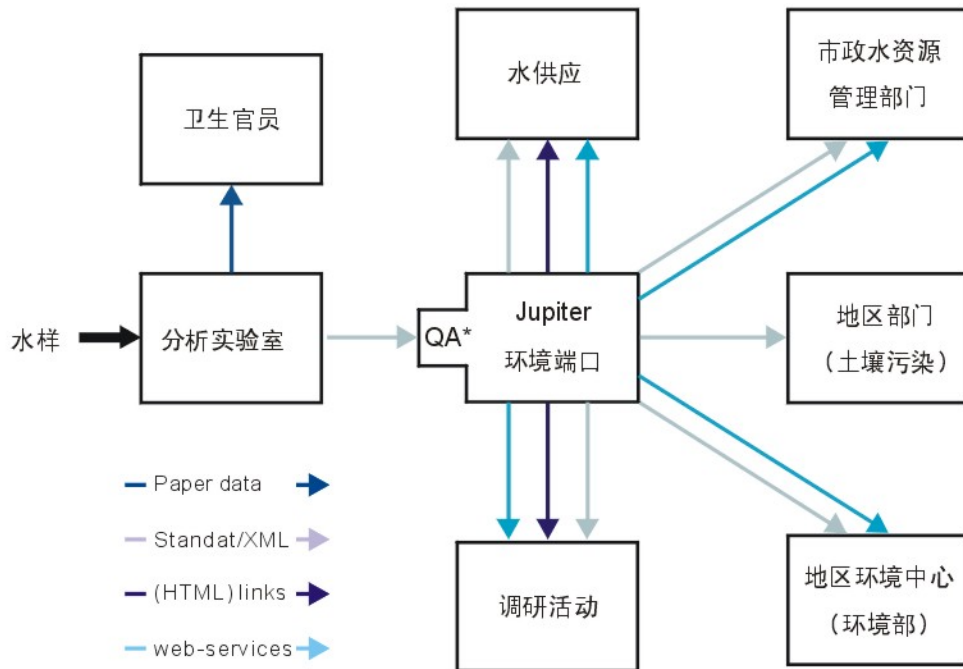
长时间以来，变更取水井地点、稳定或调整其对水流的影响，一直是一项重大挑战。而更大的挑战是，如何为新井选址或找到深层含水层，达到饮用水质标准。为了将水源地移至开阔地点，远离污染，水厂采用了从1998年开始绘制的全息水文图。



水资源数据管理

根据《丹麦供水法案》，所有已收集的供水数据都必须上报国家地下水数据库，其管理方为丹麦及格林兰地质勘测局（GEUS）。

开采和水平面测量数据直接以电子方式从供水方上报至地下水数据库。而地下水及饮用水水质数据则通过分析实验室，分别提交至地下水水质和饮用水水质国家数据库。



*由相关部门负责质量检验



使供水工作更加高效



最近大型供水厂根据用户需求，引入了针对供水质量、环境、安全等因素的参照系统，目的是提高供水效率。

数年来，用户最为关心的是节水措施。一个新式马桶每次冲水，水量为2-4升，而老式的则用水8-10升。现在家庭中的各种用水设备都安装了节水装置，包括洗衣机。而水务部门则重点关注供水水网的防漏，因为当漏水量小于总量的10%时，此部分水损耗免税。从1997年至2006年，漏水比从9%降至6%。优化管网布局，查找渗漏点，既归功于先进的管网计算系统，如丹麦的DHI项目，也更需要以详尽的管网纪录为前提。



饮用水总消耗量从1980年的6.05亿 m^3 降至2005年的4亿 m^3

最近供水部门的工作重心是提高能效和减少消耗。Groundfos研发了新式水泵，较过去节能10%，预计未来供水方面的节能前景相当可观。因而水厂可通过减少能源使用，降低二氧化碳排放为延缓全球变暖进程而做出努力。

2007年78个供水厂使用了参照系统，45%的丹麦用户被纳入其中。6年来，平均每吨饮用水售价下降了20%。

通过渗透作用，地下水经土壤和沉降层自然过滤，可变得清洁，同时土壤中的盐和石灰溶解于水中，赋予地下水独特的口感和特质。因而找到清洁的地下水，经过简单的曝气和过滤，生产出饮用水是完全可能的。分析表明97.2%的饮用水达到饮水标准。水处理和水质保障技术不断发展，从未因已达到标准而停滞不前。

1980年代起，节水一直是供水环节的工作重点。为所有用户安装独立水表的措施，收效迅速明显，有些用户节水率高达40%。同时，饮用水、污水处理根据水量，分段收费。

引入水税和VAT后，水价上升，同时定价机制变得透明。而水税，针对已批准和已开采的地下水而设，对已批准的地下水征税，旨在减少申请量，加强水资源管理。对已开采地下水征税，则有三重目的：一增加财政收入，二节约地下水，三鼓励供水厂减少水渗漏。在输水管网水渗漏量低于10%时，该部分视为可接受损耗，因而免税。灌溉视为生产环节，故对用于该用途的地下水不收税。



水税及征收

2008年水费-Aarhus市情况:

◎ 总价格	5.40欧/m ³
◎ 每m ³ 饮用水收费	1.22欧/m ³
◎ 饮用水国家税	0.83欧/m ³
◎ 地下水勘测和保护	0.07欧/m ³
◎ 污水处理税	3.24欧/m ³
◎ 国家污水税	0.04欧/m ³
◎ 每年饮用水表租赁费	54欧/年
◎ 总价包括25%的VAT	

以一个家庭平均每年用水170m³为例，供水和污水处理总价大约900欧/年—平均占丹麦家庭总收入的1.6%。

相对于瓶装矿泉水的价格，自来水仍算十分便宜。新鲜纯净的饮用水直接送至每户水龙头，费用相当与半欧/升。

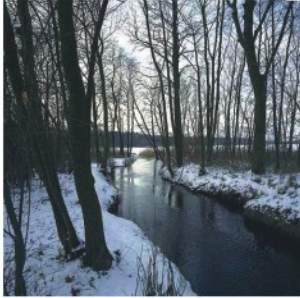
可借鉴的经验

水供应

- ◎ 采用参照系统，重点是提高效率和改善供水品质。已取得明显成效，饮用水质已有所提高，同时生产成本在几年内已下降20%。
- ◎ 引入独立水表可迅速见效，节水率可高达40%。
- ◎ 适度提高水价对于节水十分有用——20年内丹麦饮用水总供应量下降了40%。合理的水价可促使消费者采用家庭节水装置，如安装节水马桶等。对用水征税可进一步减少用水。
- ◎ 节能的潜力十分可观。如Groundfos开发的优化耗能水泵，节能10%。
- ◎ 分散开采地下水可减少对地表水的影响。然而，较小的供水厂还需配合相关部门，以符合欧盟立法规定。

地下水保护

- ◎ 全面的水文绘图对有效保护取水井区十分必要。详尽的图纸能够说服土地所有人，使其主动接受土地利用限制。
- ◎ 公众参与对实施行动保护计划，保护地下水十分有用。
- ◎ 记录水质变化，对监测地下水十分重要。
- ◎ 地下水模型是计算预测地下水水量平衡、损耗、含水区及气候变化的重要工具。
- ◎ 恢复保护区内被污染水域是可行的。
- ◎ 在全国范围内推行农业营养物使用规范，可使地下水中氮浓度显著下降。



- ◎ 治理、清理原有污染排放点和城市污染水域可减少点源污染。与农民就农药施用达成协议可减少治理点的污染。
- ◎ 对农药使用进行规范可减少农田和城市对水源的污染。
- ◎ 植树造林是流域长期保护的有效措施。在未来的80年内，丹麦将依据政策将森林面积扩大一倍。

地下水监控

- ◎ 为准确解读分析结果，对水库地质条件和水井构造的了解十分必要。
- ◎ 短井能较好的保证取样的可靠性。
- ◎ 过度开采将使各含水层的地下水混合。
- ◎ Grundfos开发的MP1水下取样泵完全改变了丹麦地下水监控工作。
- ◎ 样本必须经过恰当处理。特别要注意，短期保存的水样需冷藏，长期保存需冷冻。
- ◎ 实验室结果受人员资历，实验室技术员教育水平和设备状况影响。
- ◎ 供水和监测数据必须由可靠机构作验证担保，此后数据需向公众披露，供其使用。



联系人：

Jens Stockmarr, 高级顾问
丹麦及格林兰地质测绘局 (GEUS)
sto@geus.dk

Richard Thomsen, 局长
丹麦及格林兰地质测绘局 (GEUS)
rth@geus.dk

更多详情：www.ecoinnovation/english 选择丹麦经验